

ÉNERGIE

SEPTEMBRE 2022

WWW.BLOCKCHAINFORGOOD.FR



BLOCKCHAIN
@POLYTECHNIQUE

bpifrance
SERVIR L'AVENIR



INSTITUT
Louis Bachelier

PB PositiveBlockchain.io

A PROPOS



Écosystème, *Blockchain for Good* est une association de fait depuis 2018 et une association de loi 1901 depuis 2021. Elle a pour objet de valoriser, promouvoir, soutenir et contribuer à la recherche fondamentale et appliquée en matière d'innovations numériques, favoriser et accompagner le partage d'expériences entre l'écosystème des blockchains et les acteurs du développement durable, et promouvoir un cadre législatif et normatif favorable à l'innovation.

NOS PARTENAIRES



La **chaire Blockchain@X de l'École Polytechnique** a pour vocation d'allier excellence académique avec prestige institutionnel et scientifique afin de favoriser l'innovation en matière de blockchain. Pionnière dans son domaine et soutenue par Capgemini, Nomadic Labs et la Caisse des Dépôts, elle rassemble des scientifiques en informatique et en économie dont les recherches portent sur les blockchains et les technologies associées. La chaire propose également une offre variée de cours aux étudiants de l'École Polytechnique désireux de s'initier à ce domaine en mutation constante, et contribue à l'organisation de conférences académiques internationales telles que Tokenomics ou Future.s Of Money (FOMPARIS).



La **Caisse des Dépôts** et ses filiales constituent un Groupe public, Investisseur de long terme au service de l'intérêt général et du développement durable des territoires. La Blockchain est un enjeu stratégique majeur pour la Caisse des Dépôts, ses métiers et ses clients. Créé en 2015, le Programme Blockchain & Cryptoactifs identifie et implémente des cas d'usages à valeur ajoutée, dans le cadre de projets industriels (Archipels, Liquidshare) ou de partenariats (LaBChain, IRT SystemX), au service du Groupe Caisse des Dépôts et en soutien de l'écosystème, accompagne les acteurs publics dans le déploiement de ces technologies, et contribue aux débats réglementaires pour construire un cadre adapté, au service des enjeux de souveraineté français et européens.



L'**Institut Louis Bachelier** (ILB) est une association de loi 1901, créé en 2008, sous l'impulsion de la Direction Générale du Trésor et de la Caisse des Dépôts et Consignations. L'ADN du Groupe Louis Bachelier (ILB, FdR, IEF) est la recherche scientifique, qui favorise le développement durable en Économie et Finance. Actuellement plus de 60 programmes sont hébergés à l'ILB, avec un focus sur quatre transitions sociétales : environnementale, digitale, démographique et financière. Les activités visent à engager des académiques, des entreprises et des pouvoirs publics dans des programmes de recherche ainsi que dans les manifestations scientifiques et autres forums d'échange.



Bpifrance finance les entreprises - à chaque étape de leur développement – en crédit, en garantie et en fonds propres. Bpifrance les accompagne dans leurs projets d'innovation et à l'international. Bpifrance assure aussi leur activité export à travers une large gamme de produits. Conseil, université, mise en réseau et programme d'accélération à destination des startups, des PME et des ETI font également partie de l'offre proposée aux entrepreneurs.



PositiveBlockchain.io est tout à la fois une base de données ouverte, un média et une communauté qui explore le potentiel des technologies blockchains à impact social et environnemental. Ils aiment à s'appeler des « Blockchain Positivists ».



La **Fondation ELYX** sous l'égide de la Fondation Bullukian est reconnue d'utilité publique. Ses programmes ont pour vocation de faire de l'Agenda 2030 un succès, de participer à une culture ambitieuse et inclusive, et de valoriser l'innovation comme levier pour 2030.

L'Association Blockchain for Good publie des analyses indépendantes et les opinions exprimées dans ce rapport n'engagent que leurs auteurs et ni les individus ou les organisations consultées, ni nos partenaires, l'Institut Louis Bachelier, la chaire Blockchain@X de l'École Polytechnique, créé avec le soutien de Capgemini, NomadicLabs et la Caisse des dépôts et des Consignations, le Groupe Caisse des dépôts, la Banque Publique d'Investissement, PositiveBlockchain.io et la Fondation Elyx.

CE CAHIER EST UN EXTRAIT DU RAPPORT :

Blockchains & développement durable

2022

10 ÉQUILIBRE GÉOGRAPHIQUE

1 PAS DE POUVOIR

3 BONNE SANTÉ ET BIEN-ÊTRE

4 ÉDUCATION DE QUALITÉ

13 ÉCARTILLES

8 TRAVAIL DÉCENT ET ÉCONOMIE ÉQUILIBRÉE

7 ÉNERGIE PROPRE ET ÉCONOMIQUE

16 ÉCARTILLES

12 ÉCARTILLES

5 ÉCARTILLES

14 ÉCARTILLES

11 ÉCARTILLES

9 ÉCARTILLES

2 ÉCARTILLES

17 ÉCARTILLES

16 ÉCARTILLES

6 ÉCARTILLES

15 ÉCARTILLES

13 ÉCARTILLES

10 ÉCARTILLES

1 ÉCARTILLES

3 ÉCARTILLES

4 ÉCARTILLES

7 ÉCARTILLES

8 ÉCARTILLES

9 ÉCARTILLES

11 ÉCARTILLES

12 ÉCARTILLES

14 ÉCARTILLES

15 ÉCARTILLES

16 ÉCARTILLES

17 ÉCARTILLES

18 ÉCARTILLES

19 ÉCARTILLES

20 ÉCARTILLES

21 ÉCARTILLES

22 ÉCARTILLES

23 ÉCARTILLES

24 ÉCARTILLES

25 ÉCARTILLES

26 ÉCARTILLES

27 ÉCARTILLES

28 ÉCARTILLES

29 ÉCARTILLES

30 ÉCARTILLES

31 ÉCARTILLES

32 ÉCARTILLES

33 ÉCARTILLES

34 ÉCARTILLES

35 ÉCARTILLES

36 ÉCARTILLES

37 ÉCARTILLES

38 ÉCARTILLES

39 ÉCARTILLES

40 ÉCARTILLES

41 ÉCARTILLES

42 ÉCARTILLES

43 ÉCARTILLES

44 ÉCARTILLES

45 ÉCARTILLES

46 ÉCARTILLES

47 ÉCARTILLES

48 ÉCARTILLES

49 ÉCARTILLES

50 ÉCARTILLES

51 ÉCARTILLES

52 ÉCARTILLES

53 ÉCARTILLES

54 ÉCARTILLES

55 ÉCARTILLES

56 ÉCARTILLES

57 ÉCARTILLES

58 ÉCARTILLES

59 ÉCARTILLES

60 ÉCARTILLES

61 ÉCARTILLES

62 ÉCARTILLES

63 ÉCARTILLES

64 ÉCARTILLES

65 ÉCARTILLES

66 ÉCARTILLES

67 ÉCARTILLES

68 ÉCARTILLES

69 ÉCARTILLES

70 ÉCARTILLES

71 ÉCARTILLES

72 ÉCARTILLES

73 ÉCARTILLES

74 ÉCARTILLES

75 ÉCARTILLES

76 ÉCARTILLES

77 ÉCARTILLES

78 ÉCARTILLES

79 ÉCARTILLES

80 ÉCARTILLES

81 ÉCARTILLES

82 ÉCARTILLES

83 ÉCARTILLES

84 ÉCARTILLES

85 ÉCARTILLES

86 ÉCARTILLES

87 ÉCARTILLES

88 ÉCARTILLES

89 ÉCARTILLES

90 ÉCARTILLES

91 ÉCARTILLES

92 ÉCARTILLES

93 ÉCARTILLES

94 ÉCARTILLES

95 ÉCARTILLES

96 ÉCARTILLES

97 ÉCARTILLES

98 ÉCARTILLES

99 ÉCARTILLES

100 ÉCARTILLES

BLOCKCHAIN FOR GOOD

BLOCKCHAIN @ POLYTECHNIQUE

bpifrance
SERVIR L'AVENIR

Caisse des Dépôts
GROUPE

INSTITUT
Louis Bachelier

PositiveBlockchain.io

LIBREMENT TELECHARGEABLE SUR [BLOCKCHAINFORGOOD.FR](https://blockchainforgood.fr)

AUTEURS

Jacques-André Fines Schlumberger. Docteur en sciences de l'information et de la communication, après un Master de sciences politiques et une maîtrise de droit des affaires, Jacques-André Fines Schlumberger est entrepreneur, depuis les années 2000, sur des sujets d'innovations sociales et numériques. Il est enseignant à l'Université Panthéon-Assas (Paris 2) et auteur pour *La revue européenne des médias et du numérique*. Il s'intéresse aux blockchains et leurs applications pratiques depuis longtemps, et sous le prisme du développement durable depuis 2018.

Pierre Noro. Après plusieurs années passées au sein des programmes Blockchain et Cryptoactifs de la Caisse des Dépôts et des Consignations, Pierre Noro accompagne désormais des entreprises dans la conception et le développement de nouveaux services blockchain à impact social positif. Il est enseignant à Sciences Po Paris, au *Learning Planet Institute* (Université Paris-Cité) et chercheur. Outre ses travaux sur la gouvernance décentralisée et les problématiques éthiques dans le numérique, il collabore notamment au projet de vote en ligne décentralisé *Pebble.vote*.

Lucas Zaehringier. Co-fondateur de *Positiveblockchain.io*, Lucas Zaehringier explore les liens entre blockchain et impact social depuis 2017. Il est également *Lead Europe* chez *Verity Tracking*, une *startup* qui utilise la blockchain et la tokenisation pour décarboner les biocarburants et les chaînes de valeur biosourcées en lien avec les matières premières agricoles.

CONTRIBUTEURS

Pierre Champsavoir, Expert en gestion des risques et finance durable.

Noémie Dié, Doctorante en économie à Télécom Paris et Bpifrance Le Lab.

Alejandro Gómez, Christophe Gbossou, Membres experts, Africa 21.

Audran Gouis, Etudiant à Sciences Po Paris, Ecole d'Affaires Publiques.

Ani Ramos, Co-fondatrice de *Positiveblockchain.io*, Product Manager @Palm NFT Studio.

Razali Samsudin, Chercheur indépendant, Educateur, Co-fondateur de Sustainable ADA.

RELECTEURS - CAHIER ÉNERGIE

[Louis Bertucci](#), [Noémie Dié](#), [Audran Gouis](#).

TABLE DES MATIÈRES

ENCADRÉ : ENERGY WEB FOUNDATION -----	10
MARCHÉ DE L'ÉNERGIE DISTRIBUÉ ET RESSOURCES ÉNERGÉTIQUES DISTRIBUÉES -----	11
LES CERTIFICATS D'ÉNERGIE RENEUVELABLES DISTRIBUÉS -----	15
COMMERCE D'ÉNERGIE EN PAIR-À-PAIR (P2P) DANS LES MICRO-RÉSEAUX -----	18
FOCUS : THE SUN EXCHANGE -----	24
ENJEUX ET QUESTIONS -----	26
GLOSSAIRE -----	28
ÉDITEUR -----	38

ÉNERGIE

Nombre de projets dans la base : 124

Nombre de projets actifs : 45

Nom des projets actifs : Allinfra ; Ampere Energy ; Bitlumens ; Blok-Z ; Brooklyn Microgrid ; Clear Trace ; EcoKraft ; Electrify.Asia ; Electron ; Energy Unlocked ; Energy Web Foundation ; EnergyChain ; Enervalis ; Engie Power Corner ; Evolution Energie ; FlexiDAO ; Greeneum ; Grid Singularity ; Grid+ ; HydroCoin ; Irene Energy ; Leap ; LO3 Energy ; M-Kopa Solar ; OLI Systems ; OmegaGrid ; PowerLedger ; Powerpeers ; Prosume ; Pylon Network ; Red Grid ; Restart Energy ; Rewatt ; Share & Charge ; Solar Bankers ; SolarCoin ; SolShare ; Spectral ; Sunchain ; SunContract ; TEO : The Energy Origin ; The sun exchange ; Volt Markets ; WePower ; WPPEnergy ; *vous ne trouvez pas votre projet ? Vous connaissez un projet qui ne figure pas dans l'annuaire ? Envoyez-nous un mail à bonjour@blockchainforgood.fr.*

Ce chapitre fait l'objet d'une publication en ligne ; si vous souhaitez échanger, annoter, corriger certaines informations, rendez-vous sur ce document : <https://blockchainforgood.fr/index.php/1-2/>

L'Objectif de développement durable (ODD) 7, et notamment l'accès à l'énergie (cible 7.1) et la promotion de l'énergie renouvelable (cible 7.2), vise expressément à résoudre le double défi d'une démographie croissante et d'une « fracture électrique » faisant état d'un peu moins d'un milliard de personnes qui vivent sans électricité, et dont la moitié vit en Afrique subsaharienne. L'accès à l'énergie constitue également le pivot à partir duquel plusieurs autres Objectifs de Développement Durable peuvent être atteints, parmi lesquels l'emploi (ODD 8), la lutte contre le changement climatique (ODD 13) ou encore la production alimentaire (ODD 2 et 12).

En vertu de leurs propriétés intrinsèques, être un réseau pair-à-pair et assurer la transparence d'un registre commun dans un environnement sécurisé, les registres distribués et les blockchains trouvent, dans le domaine de l'énergie, un vaste champ d'exploration.

Dès 2015 les premiers projets ont émergé comme **Brooklyn Microgrid**, **Aizu Labs**, **Verv** ou encore **Evolution Energie**, dont certains ont disparu depuis. D'autres ont pivoté et changé de technologie, comme **M-Kopa Solar**¹. La base de données PositiveBlockchain.io fait apparaître quelque 128 projets

¹ Créé, au Kenya, en 2010, devenu une plateforme propriétaire qui associe la technologie GSM à un kit d'énergie solaire pour permettre le financement de produits via micro crédit pour les clients à faibles revenus au Kenya et qui revendique, en 2021, avoir financé près de « 400 millions de dollars ayant permis à un million de clients [au Kenya] d'accéder à de l'éclairage solaire, des téléviseurs et des réfrigérateurs économes en énergie, à des smartphones et à des prêts en espèces. » About M-KOPA ». M-KOPA, retrieved May 16 2022, <https://m-kopa.com/>



blockchains opérant dans le domaine de l'énergie dont seulement 47 sont toujours actifs en 2022.

Tous ces projets s'appuient sur le concept de tokenisation d'électricité. Une unité de production d'énergie, qu'elle soit hydraulique, éolienne ou encore solaire est assortie d'un dispositif électronique qui mesure, à la source, la quantité d'énergie produite, représentée sous la forme de tokens consignés dans une blockchain.

Cette « électricité tokenisée » peut alors faire l'objet d'échanges sur un marché de l'énergie en pair-à-pair qui permettra de produire, vendre, acheter et consommer de l'énergie verte. Puisque l'énergie provient d'une source d'énergie renouvelable, certifiée par un token, un certificat d'énergie peut être généré et revendu en tant que produit énergétique, soit en tant que crédit carbone pour une entreprise qui souhaite compenser ses émissions de gaz à effet de serre, ou alors comme un canal de financement d'énergie renouvelable certifié.

Par exemple, depuis 2019, l'entreprise française **Ledger** équipe d'un boîtier électronique les éoliennes, les panneaux solaires et les installations hydroélectriques du fournisseur d'énergie Engie. Ce boîtier capte les données de production d'électricité

des installations et les consigne dans une blockchain publique afin d'en tenir le registre sans avoir recours aux organismes de certification habituels, comme Powernext². Ce boîtier est sécurisé à la fois d'un point de vue logiciel, « *la clef privée étant sécurisée à l'intérieur du boîtier*³ » et d'un point de vue matériel, comme par exemple, l'ajout d'un accéléromètre pour repérer si le boîtier change de place et détecter toute tentative de fraude.

Le recours aux blockchains dans le domaine des énergies et leur représentation sous la forme de tokens correspond à trois grands cas d'usage, interdépendants, que nous avons classé en Commerce de l'énergie (*Energy Trade*), Certificats d'énergie (*Energy Certificate*) et Optimisation du réseau (*Grid Operations*). La décentralisation de marchés volontaires de carbone, les dons en crypto-actifs fléchés vers des projets environnementaux ou encore les projets d'agroécologie et de reforestation sont traités dans le chapitre « Environnement et Climat ».

Le marché de l'énergie en pair-à-pair consiste à mettre en relation producteurs et consommateurs d'électricité à l'échelle locale qui s'achètent et se vendent mutuellement de l'électricité. On parle d'autoconsommation collective.

2 « Powernext, marché réglementé de l'énergie : tout comprendre », Charlotte Martin, 4 octobre 2021, <https://opera-energie.com/powernext-comprendre/>

3 « [Blockchain et énergie] Engie et Ledger inventent un boîtier pour automatiser la collecte de données », Floriane Leclerc, 9 novembre 2018, <https://www.usine-digitale.fr/article/blockchain-engie-et-ledger-inventent-un-boitier-pour-authentifier-les-donnees-en-entree.N767439>

Comme le note Alice Zannini de l'université d'Utrecht aux Pays-Bas dans sa thèse « *Blockchain technology as the digital enabler to scale up renewable energy communities and cooperatives in Spain*⁴ » soutenue en 2020, « *le problème est que le système énergétique actuel est conçu pour des flux d'énergie à sens unique et ne tient pas compte du rôle des prosommateurs dans la création de flux d'énergie bidirectionnels*⁵ ». Les prosommateurs, sont des « *consommateurs d'énergie qui produisent et consomment de l'électricité*⁶ ».

L'Union européenne a ainsi financé en 2020 le projet **PV-Prosumers4Grid**⁷, conceptualisé en 2017, pour étudier cette tendance et établir la distinction entre trois concepts de prosommateurs : « *auto-consommation individuelle, utilisation collective d'une installation photovoltaïque dans un lieu donné et modèles énergétiques à l'échelle d'un quartier* ».

Les certificats d'énergie renouvelable, CER (*Renewable Energy Certificates* - REC) sont un instrument basé sur le marché qui certifie que le porteur possède un mégawattheure (MWh) d'électricité produite à partir d'une ressource énergétique renouvelable.

Une fois que le fournisseur d'électricité a injecté l'énergie dans le réseau, le certificat d'énergie renouvelable obtenu peut alors être vendu sur le marché comme un produit énergétique, notamment à d'autres entités polluantes en tant que crédit carbone pour compenser leurs émissions de gaz à effet de serre, ou alors comme un canal de financement d'énergie renouvelable certifiée.

Un « certificat d'énergie renouvelable distribué » (decentralized Renewable Energy Certificate - dREC) est, comme l'explique **Allinfra**⁸, *startup* fondée à Hong-Kong en 2018, « *la représentation numérique d'un certificat d'énergie renouvelable dont les données, consignées dans une blockchain, sont vérifiables par quiconque participe au réseau* ». L'avantage d'un tel système est que le véhicule financier, un token, permet de rendre bien plus transparent l'origine de la production d'énergie renouvelable, et surtout ne nécessite plus aucun intermédiaire entre le lieu et le moment où l'énergie renouvelable est générée et la création du certificat numérique.

La catégorie Optimisation du réseau correspond quant à elle aux projets blockchain qui exploitent et mettent en œuvre un réseau distribué d'électricité.

4 « Blockchain technology as the digital enabler to scale up renewable energy communities and cooperatives in Spain », Alice Zannini, Thesis, 2020, d'Utrecht University, <https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/36373?show=full>

5 *Ibid.*

6 « La place des prosommateurs dans un réseau énergétique en pleine évolution », Commission européenne, PV-Prosumers4 Grid N° de convention de subvention: 764786, Octobre 2017 Mars 2020, <https://cordis.europa.eu/article/id/303126-prosumers-in-the-changing-energy-grid/fr>

7 PV-Prosumers4Grid: <https://www.pvp4grid.eu>

8 Allinfra, retrieved Jun 27 2022, <https://allinfra.com/>



Fait notable et signe d'une certaine maturité, le domaine de l'énergie a vu une initiative majeure de blockchain publique, menée par l'Energy Web Foundation, qui se distingue des nombreux projets reposant sur des blockchains privées.

Energy Web Foundation est une fondation suisse à but non lucratif créée en 2017 par le Rocky Mountain Institute⁹ et Grid Singularity¹⁰ avec pour objectif de créer un « écosystème énergétique¹¹ » fondé sur les propriétés intrinsèques d'une blockchain publique dont les nœuds de validation sont gérés par une fédération de sociétés du domaine de l'énergie, qui peuvent postuler pour devenir un nœud de validation du réseau. Cette blockchain publique avec permission^{*12}, lancée en 2019 et spécialement conçue pour opérer des services liés à l'énergie, a vu se développer une trentaine d'applications décentralisées et de *smart contracts** parmi lesquels **Blok Z**, **FlexiDAO**, **Electron** ou encore **LO3 Energy**. La blockchain d'Energy Web est une blockchain publique, *open source*, dérivée de la blockchain Ethereum et qui s'appuie sur la preuve d'autorité (Proof-of-Authority) comme mécanisme de consensus. Ce qui lui permettrait de « multiplier par 30 les performances et de réduire la consommation d'énergie de deux à trois ordres de grandeur par

rapport à Ethereum¹³ ». Outre cette différence majeure avec Ethereum, la blockchain d'Energy Web Chain a également été adaptée pour faciliter l'intégration d'appareils de l'Internet des objets* et y connecter des systèmes d'énergie distribués. **Parity Technologies** et **Slock**, fondées par des développeurs d'Ethereum, travaillent de concert avec l'Energy Web Foundation pour améliorer le code source de leurs blockchains. La conception initiale de la blockchain permet donc à n'importe quel appareil ou utilisateur de lire et d'écrire des transactions, mais s'appuie sur un réseau de participants autorisés à maintenir l'intégrité du réseau et valider les transactions. Dans le cas de l'Energy Web, seuls les participants autorisés du marché de l'énergie, approuvés par le modèle de gouvernance du réseau, servent de nœuds de validation¹⁴.

Le choix d'une blockchain publique permissionnée répond aux trois problématiques identifiées par le consortium : être en mesure de répondre à une montée en puissance du service, offrir des coûts de transaction bas, et consommer peu d'énergie. En mai 2022, 27 projets dans 15 pays sont déployés sur la blockchain d'Energy Web Foundation dans quatre grands domaines : « la gestion de Ressources énergétiques distribuées (*Distributed Energy Resource (DER) management*) , la traçabilité, la gestion du cycle de vie et l'e-mobilité¹⁵ ».

9 « Our Work », RMI, retrieved May 16, 2021, <https://rmi.org/>

10 « We Build Grid-Aware Energy Markets », Grid Singularity, retrieved May 16, 2022, <https://gridsingularity.com/>

11 « What is behind the EWT tokens ? », TheLuWizz, Medium.com, June 26, 2021, <https://medium.com/geekculture/what-is-behind-the-ewt-tokens-41b63cf8059b>

12 Les mots marqués d'un astérisque renvoient vers le glossaire.

13 Energy Web Foundation: <https://www.energyweb.org/>

14 « Validators Visualization », Energy Web, retrieved May 16, 2022, <https://validators.energyweb.org/>

15 Energy Web Foundation Map: <https://www.energyweb.org/project-map/>

Marché de l'énergie distribué et ressources énergétiques distribuées

La production d'énergie centralisée et la production/consommation d'énergie distribuée sont deux modèles de production difficilement conciliables, parce que l'architecture des réseaux électriques nationaux a été construite autour de quelques très grands centres de production. Cette problématique n'est pas nouvelle. En février 2006, le n°48 du magazine d'information sur la recherche européenne publié par la Commission Européenne l'expliquait en ces termes¹⁶ :

Le système centralisé prévalant jusqu'à nos jours sur le marché européen de l'électricité est fondé sur une vision pyramidale, essentiellement ciblée sur le «devoir» de la distribution de ce vecteur énergétique essentiel. La priorité actuelle est d'assurer la «descente» d'une «manne électrique», qu'il faut d'abord générer en amont dans de gigantesques unités de production, où prédominent les grandes centrales nucléaires – avec des réacteurs délivrant des puissances moyennes de l'ordre de 1 300 MW – ou des centrales thermiques brûlant des quantités massives de combustibles fossiles. De là partent les lignes à très haute tension – *via* des réseaux interconnectés dont les tensions vont en décroissant – vers une myriade de points de consommation

répartis sur de vastes zones géographiques de dimension nationale (ou transfrontières). Bien que ces points se différencient fortement selon qu'il s'agit de consommateurs industriels, tertiaires ou individuels, les besoins à satisfaire sont unis dans une entité unique perçue comme une demande «globale». Une telle structure, bâtie sur le gigantisme, s'avère jusqu'à présent un obstacle quasi rédhibitoire au développement des énergies renouvelables qui, par nature, ne peuvent fournir de l'électricité que dans des gammes de petites ou très moyennes puissances.

Ce modèle centralisé n'a cependant pas empêché, depuis de nombreuses années, le développement progressif d'installations électriques locales, raccordées au réseau national ou non, et notamment portées par la production d'énergie éolienne, d'énergie de la biomasse, d'énergie solaire ou de micro-centrale hydraulique. Ces ressources énergétiques distribuées (RED) - Distributed energy resources (DER) sont « *des unités de production d'électricité (généralement de l'ordre de 3 kW à 50 MW) situées dans le réseau de distribution électrique, chez l'utilisateur final ou à proximité* » explique Barney L. Capehart, du College of Engineering de l'Université de Floride¹⁷. Ces ressources énergétiques distribuées, portées par

16 « Le joker de la production distribuée », RDT info, n°48, Magazine d'information sur la recherche européenne, Unité Information et Communication de la DG Recherche de la Commission européenne, février 2006, <https://web.archive.org/>

17 Distributed Energy Resources (DER), Barney L. Capehart, PhD, CEM College of Engineering, University of Florida Updated, Oct 20 2016, <https://www.wbdg.org/resources/distributed-energy-resources-der>



la baisse continue des prix des produits éoliens et solaires, englobent l'ensemble des techniques et technologies liées à la production, au stockage et à la distribution d'électricité, y compris les systèmes de « mesure de la demande », qui permettent ensuite de revendre l'électricité produite à l'échelle locale vers d'autres installations dans le même périmètre, ou encore au réseau national lorsque la législation le permet.

Comment fonctionne le marché de l'électricité en France¹⁸

Entre 1999 et 2007, le marché de l'électricité en France s'est progressivement ouvert à la concurrence et s'inscrit dans la dynamique européenne de créer un « *marché intérieur de l'énergie*¹⁹ ». Le marché de l'électricité en France articule (1) des producteurs d'électricité, (2) les gestionnaires de réseaux électriques et (3) les fournisseurs d'électricité qui opèrent sur deux marchés différents : le marché de détail, qui vise les consommateurs afin qu'ils aient accès à un contrat d'électricité ; et le marché de gros, qui désigne quant à lui le marché où l'électricité est négociée et achetée par les fournisseurs aux producteurs, avant qu'elle soit commercialisée sur le marché de détail. L'électricité ne pouvant pas être stockée pour une utilisation ultérieure, la production électrique doit s'adapter au plus près de la demande

des consommateurs sur le marché de détail et c'est le marché dit de gros qui assure cet équilibre entre l'offre et la demande d'électricité. Le marché de gros réunit les producteurs d'électricité, les fournisseurs d'énergie et les négociants qui jouent le rôle d'intermédiaire entre les deux premiers. Les transactions entre producteurs et fournisseurs ont lieu sur plusieurs types de marché dont les bourses de l'électricité, comme Epex Spot²⁰, la bourse européenne, et les marchés de gré à gré, soit sans intermédiaire entre les producteurs et fournisseurs ou soit intermédié, c'est-à-dire qui passent par un négociant en électricité. Sur le marché de gros, l'électricité est vendue en fonction de sa date de consommation, c'est-à-dire soit à court terme, dans des produits dits « spot », soit dans des produits « à terme », permettant d'anticiper les prix. L'organisation générale du marché de l'électricité n'a donc pas été pensée pour que le client final, le consommateur sur le marché de détail, se mette à produire de l'électricité, et encore moins, que ce dernier puisse échanger ses excès de production ou les réinjecter sur l'infrastructure de réseau électrique.

18 Cet encadré s'inspire de « Comment fonctionne le marché de l'électricité en France ? » publié par Hello Watt. <https://www.hellowatt.fr/contrat-electricite/marche-electricite>

19 « Marché intérieur de l'énergie » <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/45/marche-interieur-de-l-energie>

20 Epex Spot: <https://www.epexspot.com/en/market-data>

La proposition de valeur des projets blockchains est double. La première est de pouvoir considérablement simplifier les marchés, de gros ou de détail, en mesurant à la source la production d'énergie, générant au passage les instruments financiers d'incitation à la production d'électricité verte (voir *supra*). La seconde est d'adapter le marché de l'électricité à ces nouvelles unités de production électrique, sans toutefois requérir d'intermédiaires entre producteurs, gestionnaires de réseaux et consommateurs.

Les registres distribués et les blockchains semblent offrir un cadre idéal pour faire évoluer, à l'échelle locale, le modèle de production énergétique actuel, conçu pour diffuser l'électricité à sens unique, à la prise en compte du rôle des producteurs/consommateurs dans la production d'énergie entre eux et vers le réseau national.

Ces technologies sont vues en outre comme l'un des moyens de concrétiser et valoriser le développement de production d'électricité locale dans des endroits où le réseau électrique est tout simplement inexistant. Ces technologies pourraient également permettre de mieux valoriser des sources d'énergie primaire comme le solaire, l'éolien ou l'hydraulique ou des sources d'énergie dérivées, lorsque la chaleur est produite à d'autres fins, en étant en capacité de *tokeniser* la production d'énergie renouvelable.

Le sujet est cependant complexe à mettre en œuvre. « *S'il y a de plus en plus de générateurs décentralisés qui y sont connectés, il faut veiller à la stabilité du courant qui circule, à l'équilibre entre le courant produit de manière centralisée et l'apport du décentralisé* », prévient Philipp Strauss, coordinateur de Dispower au sein de l'Institut für Solare Energieversorgunstechnik de l'université de Kassel en Allemagne.

Neuf initiatives blockchains de gestion de ressources énergétiques distribuées s'appuient sur l'Energy Web Chain, parmi lesquelles **FlexAlert** en Californie, qui permet aux habitants de la région de recevoir des alertes lorsque le réseau électrique est confronté à un besoin critique d'économie, **Project EDGE** en Australie, une place de marché où les gestionnaires de réseau peuvent réguler la demande et l'achat d'électricité solaire stockée dans les batteries de milliers de foyers australiens pour équilibrer le réseau ou encore le projet **SIM-centric blockchain enabled IoT**, porté par l'opérateur de télécommunication Vodafone, qui combine une technologie blockchain centrée sur la carte SIM avec la connectivité IoT de Vodafone Business afin d'intégrer aux réseaux d'énergie, de manière sûre et efficace, des actifs renouvelables et distribués comme les éoliennes, les batteries, les pompes à chaleur et les panneaux solaires.



Electron, une *startup* londonienne créée en 2015, développe également en ce sens une infrastructure numérique s'appuyant également sur l'Energy Web Chain qui s'adresse aux opérateurs de réseaux électriques, aux marchés financiers, et aux consommateurs d'électricité pour gérer la production électrique distribuée avec des places de marché locales, permettant notamment à l'opérateur de réseaux électriques de « *gérer les défis de l'intermittence, de la congestion et de la qualité de l'énergie présentés par la pénétration croissante des énergies renouvelables*²¹ ».

Electron a déployé, depuis 2015, huit projets d'optimisation de réseau dans quatre pays. En Angleterre, un projet pilote de deux ans, appelé TraDER, a été développé dans les Orcades (*Orkney*), un archipel subarctique situé au nord de l'Écosse qui compte soixante-sept îles, dont seulement seize sont habitées.

Le projet, financé à hauteur de trois millions de livres sterling et mené en partenariat avec EDF, Scottish and Southern Electricity Networks, Kaluza (OVO Group) et d'autres acteurs, a duré de juillet 2019 à mars 2021 ; il a consisté à créer un « marché local de l'énergie à la fois physique et en temps réel » : « *La plateforme de marché d'Electron a relié des producteurs d'énergie renouvelable, soumis à des contraintes et coupures de courant, à des actifs énergétiques*

*locaux flexibles capables d'absorber l'énergie excédentaire, ce qui a permis d'exporter et de consommer davantage de production éolienne*²² » explique le site web de l'entreprise.

Ce pilote participe au développement de leur plateforme décentralisée de « réponse énergétique à la demande », Flexibility Marketplace, dont l'objet est de gérer, de manière dynamique et en temps quasi réel, des marchés d'équilibrage entre les besoins d'un opérateur local d'électricité et les besoins d'un opérateur national.

Produire localement de l'électricité propre, la consommer, vendre le surplus autour de soi ou, s'il en manque, l'acheter autour de soi. Voilà la promesse de l'autoconsommation collective d'électricité renouvelable adossée à un registre distribué de type blockchain. Le tout de manière automatique, en ayant la garantie que toutes les transactions – production d'électricité, vente et achat, seront enregistrées dans un registre distribué et infalsifiable. L'autoconsommation collective répond au défi énergétique de freiner la consommation électrique provenant de sources centralisées et fossiles et de partager le surplus énergétique d'installations « propres » au sein d'un territoire et de ses logements, commerces, bornes de recharge, etc...

21 « What blockchain can do for power grids ? », Magda Foti, Manolis Vavalis, Blockchain: Research and Applications, Volume 2, Issue 1, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2021.100008>.

22 « Blockchain energy trading live in Scotland's Orkney Islands », Jonathan Spencer Jones, May 20, 2020, <https://www.ledgerinsights.com/blockchain-energy-trading-live-scotland-orkney-islands/>

Les certificats d'énergie renouvelables distribués

En France, les Certificats d'Économie d'Énergie (CEE) ont été mis en place en 2006²³ et imposés par les pouvoirs publics auprès des fournisseurs d'énergie, appelés « les obligés » pour accélérer leur transition énergétique en réduisant leur consommation d'énergie et inciter leurs clients à faire de même. Les grandes entreprises, appartenant notamment au secteur industriel et appelés « non-obligés », peuvent également obtenir des CEE afin de les vendre sur un marché financier.

Comme l'explique Certinergy, une filiale d'Engie, spécialisée dans les CEE, « *l'acteur ayant investi dans un matériel ou un chantier visant à améliorer sa performance énergétique se voit instantanément récompensé de ses efforts en touchant de l'argent, à la vente de ses CEE*²⁴ ». Le cours du kWh est administré par Powernext²⁵ dans un registre centralisé appelé Emmy²⁶. Ces certificats d'économies d'énergie français sont à rapprocher du système européen

Renewable Energy Certificate (RECS), responsable des certificats d'énergie européen (*European Energy Certificate System* ou EECS)²⁷.

L'initiative multipartite à but non lucratif D-REC (pour *Decentralized Renewable Energy Certificate*) menée par le secteur privé²⁸ a pour objet de mettre en œuvre, tester, et expérimenter de nouveaux mécanismes financiers pour inciter et répondre à la demande des grandes entreprises d'investir dans le développement des énergies renouvelables sur les marchés en développement et émergents, et notamment en Afrique²⁹.

Une première phase du projet vise, en partenariat avec le Le Programme des Nations unies pour le développement (PNUD), à soutenir l'électrification de 1 000 hôpitaux et cliniques en Afrique et dont 45 millions de dollars de dépenses d'investissement ont déjà été obtenus en 2021³⁰.

Ainsi, un D-REC, étant la représentation numérique d'un certificat d'énergie

23 Loi n° 2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000813253/>

24 « Certificats d'Économies d'Énergie (CEE ou C2E) : le guide complet » Caroline Dusanter, 6 juin 2022, <https://opera-energie.com/certificats-economies-energie-cee/>

25 European Energy Exchange, <https://www.powernext.com/fr/fr>

26 Registre National des Certificats d'Économies d'Énergie, <https://www.emmy.fr/public/accueil>

27 Les certificats d'électricité verte (RECS) <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-certificats-electricite-verte-recs-1430/>

28 D-REC <https://www.d-recs.energy/about-us/>

29 Oct 22, 2021 SOUTH POLE. Blockchain energy trading live in Scotland's Orkney Islands May 20, 2020by Jonathan Spencer Jones <https://www.ledgerinsights.com/blockchain-energy-trading-live-scotland-orkney-islands/> <https://sustainablebrands.com/read/cleantech/from-silicon-valley-to-rural-africa-boosting-energy-access-with-the-d-rec-initiative>

30 « About us », The D-REC Initiative, retrieved May 16, 2022, <https://www.d-recs.energy/wp-content/uploads/2021/12/Overview-of-the-D-REC-Initiative.pdf>



renouvelable, certifié *via* une blockchain, il devient un instrument financier directement accessible à des entreprises cherchant à acquérir des certificats d'économie d'énergie.. Une expérimentation a été menée au Rwanda en 2020. Des panneaux photovoltaïques, connectés à des dispositifs de mesure reliés à l'internet des objets (IoT) ont été déployés dans des zones rurales hors réseau, sur de petits bâtiments. Les données de production d'énergie solaires sont consignées dans une blockchain et les certificats d'énergie renouvelable sont générés sous la forme de *tokens* D-REC, qui sont alors achetés sur des marchés financiers tout la fois par les acteurs obligés (fournisseurs d'électricité) ou non-obligés (grandes entreprises).

Il n'y pas d'intermédiaire entre le lieu de production de l'électricité, qui peut être un système solaire domestique, un système commercial en toiture, un mini-réseau communautaire ou un micro-réseau, la génération des certificats d'énergie renouvelable distribués et le marché sur lequel ces certificats seront achetés, ce qui ouvre d'immenses perspectives pour assurer le financement de ces énergies renouvelables.

Concrètement, un développeur de projet installe un système d'énergie renouvelable distribué, tel qu'un système solaire domestique, un système commercial en toiture, un mini-réseau communautaire ou d'un micro-réseau

de campus dans une zone précise. Au fur et à mesure de la production d'électricité, les données sont transmises à une plateforme de surveillance et de suivi des D-REC dont le rôle est d'agrèger des données de plusieurs systèmes d'énergies renouvelables et de les rendre conformes aux protocoles des organisations internationales de normalisation. Une entreprise achète ensuite ces D-REC et le produit de la vente revient à chaque opérateur qui aura mis en place le système d'énergie renouvelable.

« De plus en plus d'entreprises renforcent leurs engagements en matière de développement durable en achetant des énergies propres. Certaines cherchent de plus en plus à pousser leur engagement en faveur des énergies renouvelables vers les marchés émergents où elles ont une empreinte directe, ou indirecte via les partenaires de leur chaîne d'approvisionnement. Dans le même temps, il y a un besoin aigu d'énergie propre et fiable pour des choses comme les cliniques de santé ou les PME dans les communautés hors réseau dans beaucoup de ces mêmes pays³¹ », explique Patrick Bürgi, directeur de l'innovation et co-fondateur de South Pole, l'un des secrétaire général de l'initiative D-REC. *« L'initiative D-REC utilise un instrument éprouvé, basé sur le marché, pour relier ces deux problèmes d'une manière qui peut avoir un impact positif à grande échelle ».*

31 « UNDP Partners with D-REC Initiative to Scale Up Energy Access Through Innovative Investment Models », UNDP, August 3, 2021, <https://www.undp.org/press-releases/undp-partners-d-rec-initiative-scale-energy-access-through-innovative-investment>

Ayant reçu le soutien du programme de développement des Nations Unies (PNUD), **les D-RECs permettent de canaliser le financement des grandes entreprises directement vers des projets opérationnels et non plus vers des intermédiaires qui rendent opaques et complexes la vérification de ces certificats d'énergie.**

FlexiDAO, *startup* créée en novembre 2017, basée à Barcelone en Espagne et dont le siège social est à Amsterdam aux Pays-Bas s'inscrit également dans ce mouvement de « tokenisation de l'électricité » où chaque unité d'électricité devient un actif numérique générant un certificat d'énergie, dont l'émission, le transfert sont basés sur la preuve cryptographique.

Construit sur la blockchain Energy Web, les flux de données de FlexiDAO s'organisent en cinq catégories explique Accornero, co-fondateur et PDG de FlexiDAO : (1) des méta-données privées des actifs et des consommateurs stockées dans une base de données des détaillants. Les hachages sont utilisés comme preuve sécurisée des données *on-chain** pour la validation des données *off-chain**. (2) Des données contractuelles qui font le lien entre des identités anonymes (utilisateurs, biens, organisations, opérateurs, compteurs d'énergie, etc.) qui définissent et automatisent les relations contractuelles entre toutes les parties.

Des données des compteurs : l'énergie active accumulée et horodatée (à la fois consommée et produite), attribuée à une identité anonyme. (4) Des données de transaction des certificats : Données d'échange de certificats entre identités anonymes (y compris le type de certificat, comme le certificat d'origine des parcs éoliens terrestres) et (5) des données de réclamation de certificat : Les données de demande de certificat décrivent quelle identité anonyme et pour quelle période de temps le certificat a été utilisé/consommé. FlexiDAO forme ainsi la couche applicative, sous la forme de simples API (interfaces de programmation d'applications), d'un système intégrant des données disparates rendu possible par l'usage d'un registre commun.

Depuis 2017, FlexiDAO a développé de nombreux projets avec Eneco, Acciona, Microsoft, Total ou encore Google. Le plus récent, en 2022, a réuni FlexiDAO et Acciona Energia, filiale d'Acciona basée à Madrid, une entreprise espagnole développant des projets d'énergie renouvelable qui met notamment en œuvre des projets d'hydrogène vert à grande échelle.

FlexiDAO a développé pour Acciona une plateforme basée la blockchain Energy Web qui garantit l'origine renouvelable de l'hydrogène vert et permet également aux clients de vérifier le processus de transport et de livraison de ce type d'énergie propre. La plateforme, appelée GreenH2chain, a été mise en œuvre dans le cadre du projet *Power to*



*Green Hydrogen*³², destiné à créer un écosystème vert sur l'île de Majorque en Espagne. Les consommateurs d'hydrogène renouvelable peuvent ainsi « *quantifier, enregistrer et surveiller le processus de décarbonisation de leur propre approvisionnement énergétique et (...) disposer de toutes les informations détaillées sur la consommation d'hydrogène elle-même, ainsi que les données permettant de calculer les émissions de dioxyde de carbone que les consommateurs évitent en utilisant ce type d'énergie verte*³³ ».

Commerce d'énergie en pair-à-pair (P2P) dans les micro-réseaux

Les blockchains et les technologies de registres distribués permettent également d'opérer des systèmes d'énergie décentralisés et des micro-réseaux où des producteurs/consommateurs interagissent sur des marchés énergétiques en pair-à-pair.

Ce que l'on appelle l'autoconsommation collective consiste à produire localement de l'électricité propre, la consommer, vendre le surplus autour de soi ou, s'il en manque, l'acheter autour de soi, en ayant la garantie que toutes les

transactions – production d'électricité, vente et achat, seront enregistrées dans un registre distribué et infalsifiable. Les premières preuves de concept ont été réalisées il y a maintenant plus de dix ans, avec notamment, en 2011, le très médiatisé projet « Brooklyn Microgrid » conduit par Siemens, LO3Energy et Consensus, déployé à l'échelle d'un quartier de la ville de New York aux Etats-Unis. Les microgrids sont « *des réseaux électriques de petite taille, conçus pour fournir un approvisionnement électrique fiable et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs. Ils agrègent de multiples installations de production locales et diffuses [...], des installations de consommation, des installations de stockage et des outils de supervision et de gestion de la demande. Ils peuvent être raccordés directement au réseau de distribution ou fonctionner en mode îloté et peuvent concerner différentes échelles du territoire (bâtiment, quartier, zone industrielle ou artisanales, village, etc.)*³⁴ ».

Cette offre d'énergie en pair-à-pair dans des micro réseaux s'adresse également à des populations déconnectées de tout réseau électrique. Ces initiatives, comme **SunChain**, **SOLshare**, **Engie**

32 *Green Hysland* vise à déployer un écosystème d'hydrogène (H2) entièrement fonctionnel sur l'île de Majorque, en Espagne, faisant de l'île le premier centre H2 d'Europe du Sud. Cet objectif sera atteint en produisant de l'hydrogène vert à partir de l'énergie solaire et en le livrant aux utilisateurs finaux, tels que les secteurs du tourisme, du transport, de l'industrie et de l'énergie de l'île, y compris l'injection dans le réseau de gaz pour la chaleur verte et l'utilisation finale locale d'électricité. « About Greenhysland », Green Hysland, retrieved May 16, 2021, <https://greenhysland.eu/about-green-hysland/>

33 « Acciona Energia. Case study. », GreenH2Chain, retrieved May 16, 2022, <https://www.flexidao.com/case-studies/green-h2-chain-by-acciona>

34 Commission de régulation de l'énergie, autorité administrative indépendante française, créée le 24 mars 2000.



Solar Homes Systems - SolShare

Source : SolShare, <https://www.youtube.com/channel/UCTnIGAHPH93AX69NpNbZfVw>

Power Corner ou encore **Power Ledger** mettent en œuvre des systèmes solaires domestiques (*Solar Homes Systems - SHS*) et des micro-réseaux électriques (*mini-grid*) pour opérer le suivi de la production et de la consommation d'électricité à l'échelle locale.

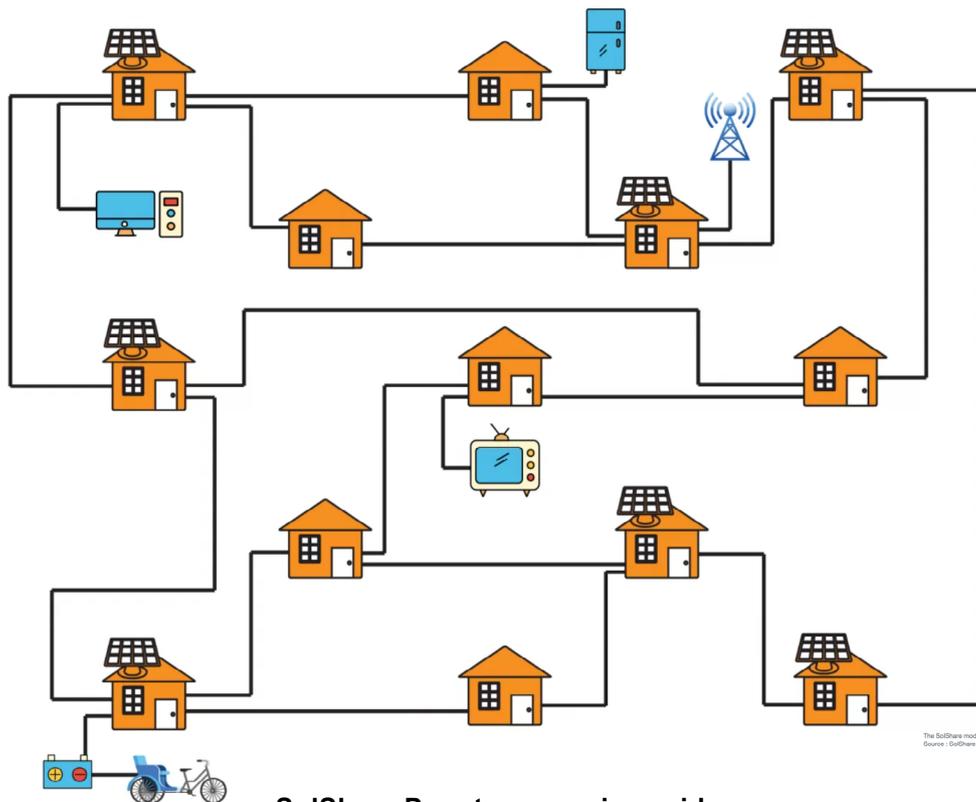
Créée en tant que filiale de la société allemande de conseil MicroEnergy International GmbH (MEI), **SOLshare** a été fondée en 2014 à Dhaka, au Bangladesh.

Elle a pour activité principale « *la conception, la gestion de la fabrication et la vente d'un contrôleur de charge innovant pour les systèmes solaires domestiques (Solar Homes Systems - SHS) qui gère l'interconnexion entre de multiples utilisateurs à un micro-réseau décentralisé de courant continu*

basse tension et facilite le commerce de l'électricité pour les ménages et les petites entreprises dans les villages hors réseau à forte densité de population³⁵ ».

SOLshare permet la mise en œuvre de micro-réseaux électriques, distribués et dynamiques permettant ainsi de fournir de l'énergie solaire à une population locale éloignée de tout réseau électrique (voir image *infra*).

35 « Home », SOLshare, retrieved May 16, 2022, me-solshare.com



SolShare Peer-to-peer microgrids

Source : SolShare, <https://me-solshare.com/>

Les personnes détentrices de panneaux photovoltaïques sur leur habitation produisent de l'électricité pour leur usage personnel et peuvent également vendre leur excédent d'électricité autour d'eux selon le réseau construit entre eux.

« Grâce à nos solutions, les communautés rurales peuvent échanger de l'énergie solaire, réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 30 % et augmenter les revenus de leurs ménages de 25 %, tandis que les conducteurs d'e-rickshaw obtiennent de meilleures possibilités de recharge et de profit ». En novembre 2021, SOLshare a pour la première fois relié un réseau d'électricité distribué au réseau électrique national.

ENGIE PowerCorner, incubé en 2015 au sein du Groupe ENGIE a mis en service PowerCorner en mars 2016, un premier micro-réseau électrique de 16 kW à Ketumbeine, un village isolé du nord de la Tanzanie, permettant d'alimenter quelque 120 maisons et entreprises locales ainsi que des services publics parmi lesquels un centre de santé rural et deux écoles. En 2020, ENGIE PowerCorner comptait 13 mini-réseaux en service dans deux pays, en Tanzanie et en Zambie, desservant 15 000 bénéficiaires et devait s'étendre en Ouganda, au Bénin et au Nigéria courant 2021. Le Groupe Engie, soutien de première heure de l'Energy Web Chain, a annoncé en juillet 2021 développer une plateforme de financement participatif qui permettra

à des micro-investisseurs de financer l'installation d'actifs énergétiques propres en mettant en jeu (*staking**) des Energy Web Tokens (EWT), le token natif de la blockchain publique Energy Web, en échange d'un taux d'intérêt fixe, à l'instar de ce que fait déjà la plateforme Sun Exchange en Afrique du Sud (voir chapitre Finance).

Power Ledger, créé en 2017 en Australie, a levé 26 millions de dollars lors d'une ICO* pour lancer une solution de créer un réseau d'échange d'énergie solaire en pair-à-pair afin de « *suivre, valider et fournir une traçabilité de chaque transaction d'énergie solaire en temps quasi réel³⁶* » explique Jemma Green, co-fondatrice de Power Ledger. Cette plateforme de marché de l'énergie solaire en pair-à-pair permet aux consommateurs de vendre leur surplus d'électricité à d'autres utilisateurs résidentiels et commerciaux.

L'entreprise a déployé sa plateforme auprès d'une trentaine de clients répartis en Australie, en Autriche, en France, au Japon, en Inde, en Malaisie, en Thaïlande et aux Etats-Unis. En 2021, Power Ledger s'est associé en Inde à l'India Smart Grid Forum (ISGF) et à Tata Power-DDL pour déployer

un pilote au nord de Delhi réunissant 65 producteurs/consommateurs avec 75 sites consommateurs dans la capitale représentant 140 bâtiments.

La plateforme permet le commerce en pair-à-pair de l'énergie solaire provenant de systèmes photovoltaïques de plus de 2 MW.

D'un point de vue technique Power Ledger a d'abord développé EcoChain™, une blockchain privée basée sur la preuve d'enjeu - Proof-of-Stake (PoS) pour tester plusieurs pilotes entre 2016 et 2017. En 2017, la plateforme a été développée sur un réseau Ethereum Consortium Proof-of-Authority (PoA) sans frais, modifié pour les besoins de l'entreprise. En juillet 2021, Power Ledger a annoncé³⁷ développer une blockchain modifiée et permissionnée basée sur la blockchain **Solana** qui permettrait, selon John Bulich, co-fondateur et Directeur technique de Powerledger, « *un débit de 50 000 transactions par seconde et s'adapter aux services déployés par Power Ledger : Pair-à-pair, services de flexibilité, traçabilité énergétique et applications d'échange de certificats³⁸* ».

36 « Co-founder of blockchain-based solar power company explains what the technology means to the future of energy », Michael O'Neill, Business Insider, April 14 2021, <https://www.businessinsider.com/cofounder-of-power-ledger-explains-how-blockchain-can-help-realize-a-decentralized-and-democratized-energy-future-2021-4>

37 « Power Ledger launches next generation blockchain, moves away from Ethereum », PowerLedger, Medium, July 12, 2021, <https://medium.com/power-ledger/power-ledger-launches-next-generation-blockchain-moves-away-from-ethereum-d00e031c4cfb>

38 « Blockchain FAQs », Power Ledger, September 2, 2021, Medium, <https://medium.com/power-ledger/blockchain-faqs-3549a9bdeb6a>



En plus de proposer un nombre plus élevé de transactions par seconde, le choix de s'appuyer sur la blockchain **Solana** s'explique parce qu'elle permet de passer d'un mécanisme de consensus par la preuve de travail, énergivore à un double mécanisme de consensus Proof-of-History et Proof-of-Stake plus en adéquation avec l'activité de Power Ledger.

Sunchain, un *spin-off*³⁹ du bureau d'étude Tecsol créé en France en 2016, a développé plusieurs installations d'autoconsommation collective reposant sur une blockchain développée sur Hyperledger, et dont la plus récente, **Smart Lou Quila**, a été lancée en mars 2021 au Cailar, dans le Gard, en France.

En partenariat avec Enedis et le fournisseur d'énergies 100% renouvelables, Planète OUI, l'initiative regroupe un lotissement de six maisons et une installation sportive, qui se partagent une électricité produite par des panneaux photovoltaïques situés sur les toits des habitations et du stade municipal, ainsi que trois batteries de stockage stationnaires et d'un système de recharge de véhicules électriques.

Le commerce de l'électricité de pair à pair (P2P) est donc un modèle basé sur une plateforme interconnectée, qui sert de marché en ligne où les consommateurs et les producteurs échangent, c'est-à-dire achètent et vendent, de l'électricité directement, sans avoir recours à un intermédiaire.

³⁹ Le *Spin-off* correspond à la création d'une nouvelle entreprise dans le cadre d'une scission relative à une branche d'activité d'une société existante, consistant en la distribution sous forme de dividendes aux actionnaires des actions de la filiale en échange des actions d'origine de l'entreprise mère. <https://www.mazars.fr/Accueil/Services/Financial-Advisory/Glossaire-Definition/S/Spin-off>



En Afrique, les ressources en biomasse et en hydroélectricité sont plus abondantes dans les régions humides, australes et centrales du continent, et l'énergie éolienne est très présente dans les régions orientales et septentrionales du continent. En revanche, le soleil est présent partout. Malgré cela, le continent, qui possède la plus grande ressource solaire au monde, n'a installé que 5 gigawatts d'énergie solaire photovoltaïque, soit moins de 1 % du total mondial. Or en Afrique subsaharienne, seuls 28 % des établissements de santé disposent d'une électricité fiable, deux tiers des écoles n'ont pas d'électricité fiable et l'enseignement à distance est inimaginable. **Le principal frein au déploiement de l'énergie solaire en Afrique est le manque de financement des entreprises et des organisations.**

Avec plus de 300 jours d'ensoleillement par an et la baisse des coûts technologiques, l'Agence internationale de l'énergie prévoit que d'ici 2040, le solaire photovoltaïque dépassera l'hydroélectricité et le gaz naturel en termes de capacité installée pour devenir la première source d'électricité du continent (Agence internationale de l'énergie 2019). Les mini-réseaux pourraient jouer un rôle essentiel dans la fourniture d'électricité aux communautés rurales et aux entreprises locales.

La plateforme **The Sun Exchange**, fondée en Afrique du Sud en novembre 2015, par Abe Cambridge est une place de marché de *microleasing* qui met en relation des investisseurs, particuliers et entreprises, avec les bénéficiaires d'installations solaires dans les zones rurales.

La plateforme Sun Exchange permet à toute personne disposant d'une connexion Internet d'acheter des cellules de panneaux solaires en ligne et de les louer à des entreprises, des hôpitaux, des écoles et d'autres organisations basées en Afrique, avec la promesse d'un rendement de 10 % sur un contrat de 20 ans. La plateforme Sun Exchange organise le processus de collecte et de distribution des loyers mensuels par le biais de Bitcoin ou de la monnaie locale. La plateforme utilise la blockchain Bitcoin pour les paiements transfrontaliers afin qu'il n'y ait aucun intermédiaire entre les bénéficiaires de l'installation qui paient leur électricité et les investisseurs qui ont participé à l'achat des panneaux solaires.

Entre janvier et novembre 2015, The Sun Exchange a installé le prototype de la première centrale solaire dans une école de la région du Cap, entièrement financée par des particuliers en crypto-actifs. En février 2022, plus d'une cinquantaine d'installations solaires ont été financées par des investisseurs répartis dans 183 pays dans le monde et pour une capacité électrique totale de 10,9 mégawatts.



Comment The Sun Exchange met en place un projet solaire local ?

Une équipe d'ingénieurs de la société The Sun Exchange évalue, avec des entreprises de construction locale, la faisabilité technique et économique ainsi que les impacts sociaux et environnementaux d'un projet solaire. Une fois que le projet est prêt à être financé, il est publié sur la plateforme de financement participatif, où tout le monde peut s'inscrire et acheter des cellules solaires - au prix de 50 rands sud-africains (4 dollars) par cellule. Une fois toutes les cellules solaires vendues, le partenaire local se charge des travaux de construction, qui durent en moyenne de quatre à six semaines.

Les panneaux solaires sont connectés à la plateforme The Sun Exchange par le biais de *smart contracts** utilisant des capteurs de l'Internet des objets (IoT). Une fois les installations solaires opérationnelles, le bénéficiaire paie pour consommer l'électricité produite par les cellules, et les propriétaires du panneau solaire reçoivent chaque mois le montant correspondant à leur investissement, sous forme de loyers nets d'assurance et de frais de service, payés en monnaie locale ou en Bitcoin.

Les bénéficiaires sont des écoles, des maisons de retraite, des petites et moyennes entreprises, des parcs naturels, des associations à but non lucratif et d'autres

organisations qui ne peuvent pas se permettre l'investissement initial d'une installation solaire. Grâce aux installations solaires de The Sun Exchange, ces organisations ont réduit leurs coûts énergétiques de 20 à 30 % et ont pu réorienter ces fonds vers leurs offres principales, notamment en offrant une éducation de qualité aux enfants, des environnements de vie positifs aux résidents âgés et des soins aux animaux sauvages vulnérables. En 2019, les projets menés dans les écoles et les maisons de retraite ont bénéficié à quelque 5 500 apprenants et 150 personnes âgées.

Pour que la plateforme The Sun Exchange perdure, le coût de l'électricité solaire photovoltaïque doit être inférieur à celui de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles ou d'énergies à forte intensité carbonique. La baisse des coûts technologiques a entraîné une chute drastique du prix de l'électricité solaire. Selon le rapport 2019 New Energy Outlook de BloombergNEF⁴⁰, le coût des modules solaires a diminué de 89 % depuis 2010 et diminuera encore de 34 % d'ici 2030.

En outre, la blockchain et les crypto-actifs rendent possible le financement d'impact grâce à des paiements transfrontaliers sans friction qui contournent les intermédiaires financiers coûteux entre les micro-investisseurs et les bénéficiaires des projets solaires grâce à des *smart contracts**.

40 « BloombergNEF New Energy Outlook 2019 », BloombergNEF, 2019, <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>



ENJEUX ET QUESTIONS

Parce que la diversité des expérimentations mettant en œuvre des blockchains dans le domaine de l'énergie a débuté il y a plus de dix ans, le secteur semble gagner en maturité plus rapidement que d'autres. L'initiative menée par l'Energy Web Foundation donne à voir l'intérêt d'une blockchain publique permissionnée à partir de laquelle d'autres entreprises, *startups* ou gouvernements innovent en s'appuyant sur un registre et une infrastructure commune.

Que ce soit pour tenir les registres de transactions d'approvisionnement, de comptage et de facture en énergie, plusieurs autres applications offrent des perspectives prometteuses, notamment dans le domaine des certificats d'énergie, des garanties d'origine ou encore des quotas d'émission. Il s'avère toutefois que le développement de ces initiatives reste confronté à des enjeux de taille.

Le secteur de l'électricité met en œuvre une infrastructure critique dont l'exploitation et la maintenance doivent être prises en charge par

un ou des opérateurs. En revanche, la désintermédiation induite par le développement de projets blockchain montre « *que certains intermédiaires comme les plateformes de négociation (trading platforms), les négociants, les banques ou les sociétés d'énergie, pourraient non pas ne plus être nécessaires, mais leur rôle serait en tout cas considérablement réduit* » expliquait déjà en 2016 le rapport « *Blockchain – an opportunity for energy producers and consumers ?* » publié par PWC¹.

Comment anticiper la montée en puissance du nombre d'utilisateurs du commerce d'énergie en pair-à-pair, dont les blockchains servent de registre pour consigner la production et la consommation d'électricité ? Seront-elles capables d'absorber des centaines de milliers voire des millions de transactions ? Que se passerait-il en cas de coupure du réseau ? Qui serait responsable et qui prendrait en charge les éventuels coûts de réparation, qu'ils soient matériels ou logiciels ? N'y a-t'il pas un risque de « fracture électrique » entre les particuliers capables de

¹ « Blockchain – an opportunity for energy producers and consumers ? », PWC, 2016, <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf>

s'équiper et devenir producteurs d'énergie, et ceux qui resteront *de facto* des consommateurs.

Ceci étant, des initiatives blockchains apportent une réponse innovante à cette problématique, comme l'illustre la plateforme The Sun Exchange ou encore SolShare.

Comment permettre également au gestionnaire historique des réseaux électriques d'adapter et d'équilibrer la production d'énergie selon l'offre et à la demande générés par ces réseaux périphériques ?

Se pose également la question de la confidentialité des données échangées sur ces plateformes.

Sur le marché des « prosommateurs », à la fois producteurs et consommateurs d'électricité, comment garantir que les transactions soient tout à la fois certifiées tout en respectant la confidentialité des données personnelles ? La question de la gestion des contentieux du fait de l'absence d'intermédiaires est également entière.

Enfin, un autre enjeu, primordial, est celui de l'évolution du cadre réglementaire qui permettrait aux mini-réseaux de se déployer plus largement sur les territoires, ce qui implique une meilleure articulation et une plus grande efficacité de l'échange et du partage de données entre le réseau national et ces mini-réseaux.

GLOSSAIRE

Altcoin : Un Altcoin désigne toutes les crypto-actifs alternatifs au bitcoin. Depuis la création du premier bitcoin en 2009, le site coinmarketcap.com en dénombrait 2 360 au 22 juillet 2019, 10 429 au 15 juin 2021 et 20 246 en juillet 2022.

AMM - *Automated Market Maker*. Voir “Teneur de Marché Automatisé”.

API : En informatique, une interface de programmation applicative (en anglais *Application Programming Interface*) est un ensemble normalisé de classes, de méthodes ou de fonctions qui sert de façade par laquelle une blockchain va offrir des services à d'autres logiciels. Une API blockchain spécifie comment des programmes informatiques pourront se servir des fonctionnalités et des données distribuées accessibles dans le registre d'une blockchain.

Attestations vérifiables - *Verifiable Credential* - (VC) : preuves numériques délivrées par un tiers (appelé *issuer*) à un utilisateur (*holder*) prouvant une caractéristique de son identité (son âge, son lieu de naissance, ...). Ainsi, en présentant ces attestations vérifiables à un vérificateur (*verifier*), l'utilisateur peut transmettre les informations strictement nécessaires pour accéder à un service tout en restant maître de ses données personnelles.

Atomic Swap : En finance, le *swap*, de l'anglais *to swap* – échanger, désigne un contrat d'échange financier. Dans le domaine des crypto-actifs, un Atomic

Swap désigne une méthode d'échange de token en pair-à-pair. Cette méthode repose sur un *smart contract** spécifique appelé « contrats à empreinte numérique verrouillés dans le temps » (*hashed TimeLocked Contracts* (HTLCs)). Le principe repose sur la garantie que les deux personnes qui échangent des tokens le feront réellement. Le *smart contract* requiert que le destinataire d'un paiement accuse réception du paiement dans un temps imparti, en générant un récépissé cryptographique. Si ce n'est pas le cas, le destinataire perd le droit d'accéder aux fonds qui sont alors retournés à l'expéditeur.

Arbre de Merkle ou **arbre de hachage** : En informatique et en cryptographie, un arbre de Merkel est une structure de données contenant un résumé d'information d'un grand volume de données. Le principe d'un arbre de hachage est de pouvoir vérifier l'intégrité d'un ensemble de données sans les avoir nécessairement toutes au moment de la vérification. Pour ce faire, au sein d'une série de données, l'une d'entre elles est hashée. Ce hash sera accolé à un hash d'une deuxième donnée issue de la même série. Cette concaténation va permettre de créer un hash parent. Le processus se répète avec les hash parents jusqu'à arriver à un hash unique, appelé le hash sommet. Ainsi, pour vérifier l'intégrité d'une donnée, il suffit de connaître le hash des données qui lui sont reliées.

Block Explorer : Voir “explorateur blockchain”.

CEX / DEX : *Centralized Exchange Platform / Decentralized Exchange Platform* - voir DEX.

Crypto-actif stable - Stable coin : crypto-actif collatéralisée par une monnaie fiduciaire ou sur un autre crypto-actif, respectant une parité fixe vis-à-vis de celle-ci ou celui-ci. Par exemple, le crypto-actif stable Dai de MakerDAO respecte une parité fixe vis-à-vis du dollar américain : 1 Dai = 1 USD. Il existe trois types de crypto-actifs stables, correspondant à trois moyens de respecter cette parité. D'une part, les crypto-actifs stables centralisés sont créés à partir de réserves en monnaie fiduciaire (par exemple, le dollar américain) déposées par les utilisateurs dans l'application et conservées en banque par les opérateurs du service. De fait, la quantité de crypto-actifs mise en circulation correspond exactement aux réserves de monnaie fiduciaire. D'autre part, les crypto-actifs stables décentralisés sont créés à partir de réserves dans d'autres crypto-actifs. Ainsi, les crypto-actifs stables sont créés en fonction de la valeur, en dollar, des autres crypto-actifs détenus en réserve. Le Dai de MakerDAO, précédemment mentionné, est un crypto-actif stable décentralisé. Enfin, il existe des crypto-actifs stables décentralisés

algorithmiques, qui sont créés en fonction des variations d'une autre crypto-actif créé par le même opérateur de service. Cet autre crypto-actif sera émis et racheté de sorte à faire fluctuer le cours par rapport au dollar américain. Sa valeur en dollar permettra de créer des crypto-actifs stables. Ce processus a été très décrié notamment lors de l'effondrement du stablecoin algorithmique Luna/Terra.

dApps - *Decentralized Application, Application décentralisée* : Pour Andreas Antonopoulos¹, une application décentralisée inclut « *un ou plusieurs smart contract déployé(s) sur une ou plusieurs blockchain, une interface utilisateur transparente, un modèle distribué de stockage de données, un protocole de communication de messages de pair à pair et un système décentralisé de résolution de noms*² ». Une fois déployée sur une blockchain publique comme Ethereum, le code informatique d'une application décentralisée (dApp) ne peut être ni supprimé ni arrêté afin que quiconque puisse en utiliser les fonctionnalités. Cela veut dire que même si la personne ou le groupe de personne à l'origine de l'application disparaît, l'application décentralisée, quant à elle, continuera de fonctionner.

DAO - *Decentralized Autonomous Organization, Organisation Autonome Décentralisée* : Une DAO est une organisation de personnes fonctionnant

1 Auteur du livre de référence « Mastering Bitcoin 2nd Edition: Programming the Open Blockchain », 2017, O'Reilly, ISBN 978-1491954386

2 « Mastering Bitcoin - Second Edition », Andreas M. Antonopoulos, Creative Commons, retrieved Jun 15 2022, <https://github.com/bitcoinbook/bitcoinbook>

grâce à un programme informatique qui fournit des règles de gouvernance à la communauté sans direction centralisée. Ces règles sont transparentes et immuables parce que codées dans un protocole blockchain.

DeFi - *Decentralized Finance* : voir “Finance décentralisée”

Delegated Proof of Stake : voir “Preuve d’enjeu déléguée”.

DEX - *Decentralized Exchange*, Échanges décentralisés : Un échange décentralisé (DEX) est un type d’échange de crypto-actifs qui fonctionne en pair-à-pair et sans intermédiaire. Contrairement aux plateformes d’échanges centralisées (CEX, *Centralized Exchange*), comme Binance ou Kraken, les échanges s’opèrent directement entre les utilisateurs, réduisant ainsi le risque de vol causé par le piratage des échanges, la manipulation des prix et garantissant un meilleur anonymat.

Explorateur de blockchain : Toute blockchain publique dispose d’une interface de ligne de commande (*Command line interface* - CLI) pour afficher l’historique des transactions sur le réseau. Afin de permettre à quiconque d’accéder à l’historique de ces transactions, la plupart des blockchains publiques proposent également un « explorateur » accessible *via* un navigateur web afin d’afficher de manière conviviale les informations recherchées. Voir par exemple <https://www.blockchain.com/explorer>.

Ethereum Virtual Machine - Machine Virtuelle Ethereum : entité virtuelle unique permettant l’exécution de tous les *smart contracts** de toutes les applications décentralisées (dApps) et de toutes les Organisations autonomes décentralisées (DAO en anglais) développées sur la blockchain publique sans permission Ethereum. En effet, Ethereum peut être comparé à un automate fini distribué. Un automate fini distribué est une construction mathématique pouvant changer d’état. Ethereum possède deux états : un état lui permettant de gérer tous les comptes et les soldes des paiements effectués avec son crypto-actif natif, l’Ether ; et un état appelé “état machine”. Cet “état machine” change de bloc en bloc, de sorte à exécuter les *smart contracts** qui s’y trouvent. Les changements de l’état machine s’effectuent selon un ensemble de règles. Ces règles spécifiques de changement d’état de bloc à bloc sont définies par l’Ethereum Virtual Machine (ethereum.org).

Feature phone - *Téléphone basique* : Téléphone mobile possédant les caractéristiques techniques basiques d’un *smartphone*.

Fork (*hard / soft*) - Scission : En langage informatique, un *fork* consiste à créer un nouveau logiciel à partir du code source d’un logiciel existant. Un *soft fork* apporte des modifications à la blockchain concernée qui vont s’appliquer uniquement dans le futur, alors que les modifications introduites par un *hard fork* valent également pour le passé.

Un *hard fork* consiste donc à réécrire le code source d'un protocole blockchain après son lancement.

Finance Décentralisée - *Decentralized Finance (DeFi)* : La *DeFi* est un écosystème d'applications reproduisant des services financiers sur une blockchain. Elles permettent à quiconque en a les moyens et indépendamment du pays où il se trouve ou de sa nationalité, d'emprunter, prêter et investir, assurer et échanger des crypto-actifs sans passer par un intermédiaire, les transactions étant sécurisées via l'usage d'une blockchain et de *smart contracts*.

Hachage (fonction de) : fonction mathématique qui transforme n'importe quel contenu sous la forme d'un nombre hexadécimal. À la moindre modification du contenu, le nombre haché devient totalement différent. L'intérêt d'une fonction de hachage est qu'elle ne s'applique que dans un sens : le hachage obtenu ne permet pas de remonter au contenu d'origine, en revanche il suffit de hacher à nouveau ce contenu pour vérifier que le hachage en résultant est identique, preuve qu'aucune modification n'est intervenue. Les blocs de transaction d'une blockchain sont ainsi hachés au fur et à mesure et permettent d'avoir la garantie qu'ils n'ont jamais été modifiés depuis la première transaction.

ICO - *Initial Coin Offering*, Offre initiale de token : Émission de tokens échangeables contre des crypto-actifs pour lever des fonds auprès d'une communauté.

Contrairement à une IPO (*Initial Public Offering*) qui permet la cotation des actions d'une société sur un marché boursier, une ICO n'est pas encadrée par un régulateur financier.

IPFS - *InterPlanetary File System* (IPFS), Système de fichier inter-planétaire : Un système distribué de fichiers pair à pair dont l'objectif est de stocker des informations et des données de manière décentralisée, sécurisée et confidentielle, permettant ainsi de se prémunir contre toute forme de censure. Aujourd'hui, une recherche d'information sur le web consiste à demander à un moteur de recherche "où se trouve le contenu" afin d'identifier l'URL du serveur où il se trouve ; une recherche dans l'IPFS consiste à demander au système "le contenu que l'on recherche", identifié par un hash cryptographique unique et permanent. Créé en 2014 par Juan Benet, IPFS est un protocole *open source* qui pourrait se développer à côté du protocole HTTP inventé par Tim Berners-Lee en 1991.

Lightning Network - réseau Lightning : Protocole de paiement de pair-à-pair construit comme une application de deuxième couche sur la blockchain Bitcoin qui permet d'opérer des transactions en bitcoin extrêmement rapides, de l'ordre d'un million par seconde, quasiment sans frais et sans dépense énergétique, puisque la validation des transactions ne nécessite pas de minage par la preuve de travail. Depuis 2015, des acteurs de la communauté Bitcoin, dont notamment

Lightning Labs, Blockstream et ACINQ, travaillent sur ce protocole qui apporte l'une des réponses au problème de changement d'ordre de grandeur (scalabilité) de Bitcoin qui, pour rappel, ne peut traiter que 7 à 10 transactions par seconde. Le réseau Lightning fonctionne depuis mai 2018.

Mainnet / Testnet : Le terme *mainnet* est utilisé pour décrire le moment où un protocole blockchain est entièrement développé et déployé, et que les transactions en crypto-actifs sont diffusées, vérifiées et enregistrées sur la blockchain. Le terme *testnet* décrit l'environnement de développement et de tests avant le lancement du *mainnet*.

Mineur : validateur de transactions sur une blockchain. Le mineur est rémunéré dans le crypto-actif natif de la blockchain au sein de laquelle il valide les transactions.

Monnaie fiduciaire - fiat money : Monnaie sous la forme de pièces et de billets, dont la valeur nominale est supérieure à la valeur intrinsèque. La confiance (*fiducia* en latin) que lui accorde l'utilisateur comme valeur d'échange, moyen de paiement, et donc comme monnaie repose sur le cours légal attribué par l'État.

NFT (Non-Fungible Token) : littéralement jetons non-fongibles. *A contrario* de deux pièces de monnaies fongibles, c'est-à-dire qui ne peuvent être différenciées (une pièce d'un euro ressemble en tous points à une autre pièce d'un euro), un NFT est un token unique, cette unicité lui faisant perdre son caractère fongible.

Un NFT exécute du code informatique stocké dans des *smart contracts** conformes à des normes différentes telles que ERC-721 sur Ethereum.

On Chain/Off Chain : Quand une transaction s'effectue *on-chain*, cela veut dire qu'elle est inscrite dans un bloc de transaction enregistré dans une blockchain. En revanche, une transaction *off-chain* se déroule en dehors de ladite blockchain. Par exemple, les transactions sur le Lightning Network (voir *supra*) sont effectuées en dehors de la blockchain de Bitcoin et sont dites *off-chain*.

Oracle : dans le domaine des blockchains, un Oracle est une source d'information provenant du monde physique sur laquelle est connecté un ou plusieurs *smart contracts* et dont les parties s'entendent sur la fiabilité des données. On peut prendre comme exemple l'IATA pour les données liées aux vols aériens ou encore Météo France pour les données liées à la météorologie (précipitation, gel, neige etc.). Utilisées dans le cadre d'applications décentralisées, les données d'un oracle permettent d'enclencher les termes d'un *smart contract*. Par exemple, une assurance paramétrique remboursera automatiquement un agriculteur en cas de perturbation météorologique dont les données sont certifiées par un oracle.

Phrase mnémotechnique - Seed Phrase : Suite de mots (généralement 12 ou 24) permettant la récupération d'un portefeuille de cryptomonnaies depuis n'importe quel appareil.

Pool de minage : association de mineurs coopérant pour la réalisation du travail de validation des transactions au sein d'une blockchain. Les gains effectués par les machines acquises en commun sont partagés entre les membres du *pool* de minage.

Portefeuille (de crypto-actifs), *Wallet* : en matière de crypto-actif, un portefeuille est un dispositif qui peut prendre la forme d'un support physique, d'un programme informatique ou encore d'un service, et dont l'objet est de stocker les clés publiques et/ou privées de crypto-actifs. Ce procédé de stockage de la clé privée, connue du seul propriétaire du portefeuille, permet à son détenteur de signer des transactions et de prouver à l'ensemble des pairs du réseau blockchain qu'il est bien le propriétaire des crypto-actifs utilisés.

Portefeuille d'identité - *Identity Wallet* : Portefeuille composé d'attestations vérifiables. Voir Attestation vérifiable

Preuve d'enjeu déléguée - *Delegated Proof of Stake* : Mécanisme de consensus réduisant le nombre de noeuds d'une blockchain et reposant sur l'élection de mineurs (les validateurs de blocs de transactions sur une blockchain) qui ont immobilisé des fonds (*stake*) en crypto-actifs dans une blockchain au prorata de ce que chacun possède.

Preuve à divulgation nulle de connaissance - *Zero Knowledge Proof* (ZKP) : Une preuve à divulgation nulle de connaissance est une méthode de

chiffrement qui permet à une personne (le prouveur) de prouver à une autre personne (le vérificateur) qu'elle est en possession de certaines informations sans les révéler au vérificateur. En d'autres termes, la preuve à divulgation nulle de connaissance permet de présenter des preuves de faits portant sur des données personnelles sans pour autant révéler ces données personnelles. Les preuves à connaissance nulle ont été conçues pour la première fois en 1985 par Shafi Goldwasser, Silvio Micali et Charles Rackoff dans leur article «*The Knowledge Complexity of Interactive Proof-Systems*».

Proof-of-stake : Preuve d'enjeu, ou Preuve de participation. Méthode pour valider les blocs de transactions d'une blockchain imaginée par Scott Nadal et Sunny King en 2012. Cette méthode demande à l'utilisateur de prouver la possession d'une certaine quantité de crypto-actif pour prétendre pouvoir valider des blocs supplémentaires dans ladite blockchain et pouvoir percevoir la récompense à l'addition de ces blocs. Ce mécanisme de consensus consiste à résoudre un défi informatique appelé *minting* (monnayage), opéré par des « forgeurs ». Il ne nécessite pas de matériel informatique puissant, consomme peu d'électricité et tient sur un nano ordinateur comme le Raspberry Pi. Pour valider un bloc de transactions, le forgeur met en dépôt une certaine quantité de crypto-actifs et reçoit une récompense lorsqu'il valide un bloc pour le blocage de ce capital. Si le forgeur procède à une attaque informatique en insérant de faux blocs de transactions dans la blockchain,

la communauté, à partir du moment où elle s'en rend compte, pourrait procéder à un *hard fork**, ce qui entraînerait la perte des dépôts de l'attaquant. Vitalik Buterin, cofondateur d'Ethereum explique : « *la philosophie de la preuve d'enjeu résumée en une phrase n'est donc pas "la sécurité vient de l'énergie dépensée", mais plutôt "la sécurité vient des pertes économiques engendrées par une attaque" »*.

Proof of Authority (PoA) - Preuve d'autorité : La preuve d'autorité est un algorithme de consensus qui désigne un nombre restreint et identifié d'acteurs au sein d'un réseau blockchain ayant le pouvoir de valider les transactions et de mettre à jour le registre. Cet algorithme de consensus est souvent mis en œuvre sur des blockchains privées ou de consortium. L'intérêt pour ces acteurs, souvent bancaires, étant de gagner en auditabilité et ainsi de réduire et d'optimiser les coûts liés à leur coordination.

REDD + *Reducing Emission from Deforestation and Forest Degradation* : mécanisme mis au point par les parties prenantes à la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), qui crée une valeur financière pour le carbone stocké dans les forêts en offrant aux pays en développement des incitations à réduire les émissions provenant des terres forestières et à investir dans des stratégies de développement durable à faibles émissions de carbone. Au-delà de la déforestation et de la dégradation des forêts, REDD + inclut le rôle de la conservation, de la gestion durable des forêts et de l'amélioration des stocks de carbone des forêts.

RFID : Identification par Radiofréquence, *Radio Frequency identification* : désigne une méthode d'identification de données à distance, incorporées, sous la forme de tag, dans des objets ou des produits et comprenant une antenne associée à une puce électronique.

Satoshi : Un Satoshi est la plus petite unité divisible d'un Bitcoin, soit le 8e chiffre après la virgule. Un satoshi est donc égal à 0,00000001 bitcoin. Le nom s'inspire du nom de la personne ou du groupe de personnes ayant publié le livre blanc fondateur de Bitcoin en 2008.

SDK - *Software Development Kit*, Kit de développement logiciel : Ensemble d'outils d'aide à la programmation pour la conception et le développement de logiciels ou d'applications.

Seed Phrase - Phrase mnémotechnique : voir "phrase mnémotechnique".

Sidechain : Une *Sidechain* est une blockchain secondaire ou parallèle conçue pour fonctionner à côté d'une blockchain primaire, publique, afin d'en accroître les capacités et remédier à leurs limites inhérentes, notamment de mise à l'échelle (scalabilité). Le recours à une *Sidechain* permet de traiter des opérations sans solliciter la blockchain primaire afin, par exemple, de réaliser des calculs spécifiques, ou encore de traiter des *smarts contracts* dans un environnement privé avant que les données soient enregistrées dans une blockchain primaire, comme Bitcoin ou Ethereum.

Smart Contract : Selon le site Ethereum.org, les contrats intelligents sont « *des applications qui s'exécutent exactement telles que programmées, sans possibilité de les arrêter, non censurables, sans fraude possible et sans interférence de tierce partie* ». L'intérêt de ces contrats est qu'ils sont autonomes, automatiques et répliqués dans tous les nœuds d'une blockchain, et que leur exécution ne passe pas par un tiers de confiance pour en garantir la validité. Plusieurs blockchains publiques permettent de mettre en œuvre des *smart contracts*, dont notamment Ethereum, Polkadot, Tezos, Stellar ou encore Solana.

Staking : Le *staking* consiste, pour un utilisateur, à immobiliser et verrouiller des tokens dans un *smart contract*. Le protocole attribue de façon aléatoire à l'un des participants le droit de valider un bloc de transactions et recevoir une récompense en token. Le mécanisme de la "preuve de détention", *proof of stake* incite les utilisateurs à immobiliser leur token, la probabilité d'être choisi pour valider un bloc de transaction étant proportionnelle au nombre de tokens verrouillés. Plus l'utilisateur a de tokens verrouillés, plus la probabilité d'être choisi pour valider la transaction est grande. Si un utilisateur tente d'écrire de fausses transactions dans un bloc, il perd ses tokens immobilisés et se fait bannir du réseau.

Stablecoin : voir "Crypto-actif stable".

Teneur de marché automatisé : protocole permettant de calculer le taux de change entre deux crypto-actifs de manière automatique. Le teneur de marché automatisé est à la base de tous les DEX (*Decentralised Exchange*), et permettent à ses usagers d'échanger des crypto-actifs entre eux en pair-à-pair, sans passer par un tiers. La première plateforme à utiliser ce principe se nomme Uniswap.

Token / Tokenisation : Un token, jeton en français, est une unité (un actif) numérique échangé sur une blockchain. Le bitcoin est le jeton de la blockchain Bitcoin. L'Ether est le jeton de la blockchain Ethereum. Par extension, l'expression « tokenisation » désigne l'idée qu'un actif, quel qu'il soit, puisse être représenté numériquement et échangé *via* une blockchain.

Tolérance aux pannes byzantines (*Byzantine Fault Tolerance, BFT*) : La tolérance aux pannes byzantines est une solution au problème logique des généraux Byzantins. Ce problème logique, élaboré en 1982, consiste à expliquer les difficultés de coordination simultanée des actions de trois armées commandées par trois généraux alliés. En effet, ces derniers doivent attaquer ou battre en retraite en même temps. Or, un général ne peut connaître les actions des autres que par l'intermédiaire d'émissaires. Par conséquent, un général malveillant envoyant une information erronée aux deux autres brouillera les actions des alliés.

En appliquant cette situation aux réseaux informatiques, on peut en déduire que seulement un tiers des membres d'un réseau est capable de nuire à l'entièreté de ce dernier. La tolérance aux pannes byzantines est la capacité d'une technologie donnée de se prémunir contre ce type de comportement. Les mécanismes de consensus par la preuve de travail et par la preuve d'enjeu sont des exemples de solutions rendant les blockchains tolérantes aux pannes byzantines.

Tolérance aux pannes byzantines asynchrones (asynchronous Byzantine Fault Tolerance, aBFT) : La tolérance aux pannes byzantines asynchrones est une manière alternative de répondre au problème des généraux byzantins (voir

supra). Plutôt que de faire en sorte que les trois généraux soient coordonnés en permanence, il s'agit de confier la direction des trois armées aux généraux bienveillants, tout en excluant le général malveillant du contrôle de son armée. Du point de vue d'un réseau informatique, un réseau tolérant aux pannes byzantines asynchrones authentifie les membres bienveillants de ce dernier pour leur confier la responsabilité de le faire fonctionner.

Wallet - Portefeuille : voir "portefeuille d'identité"

Zero Knowledge Proof - Preuve à divulgation nulle de connaissance. Voir "Preuve à Divulgation Nulle de Connaissance".

Rapport publié par l'Association Blockchain for Good
Directeur de la publication : Jacques-André Fines Schlumberger - Septembre 2022
bonjour@blockchainforgood.fr



Les contenus de ce rapport sont mis à disposition selon les termes de la **Licence Creative Commons : Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International**.

Vous êtes autorisés à : Partager — copier, distribuer et communiquer le rapport par tous moyens et sous tous formats. Adapter — remixer, transformer et créer à partir du rapport selon les conditions suivantes : Attribution — Vous devez créditer le rapport, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications au rapport ont été effectuées. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que l'Offrant vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son rapport. Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisés à faire un usage commercial de ce rapport, tout ou partie du matériel le composant. Partage dans les Mêmes Conditions — Dans le cas où vous effectuez un remix, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant le rapport original, vous devez diffuser le rapport modifié dans les mêmes conditions, c'est à dire avec la même licence avec laquelle le rapport original a été diffusé. V.1.0