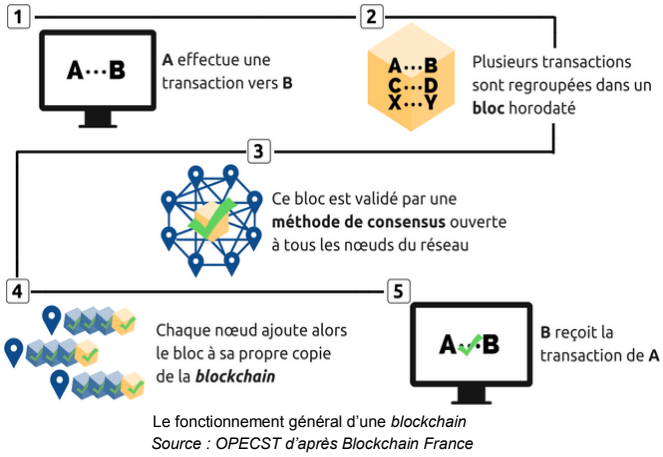
LES NOTES SCIENTIFIQUES DE L'OFFICE
OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Note n° 4

Comprendre les *blockchains* (chaînes de blocs)

Avril 2018



Le fonctionnement général d'une *blockchain*
Source : OPECST d'après Blockchain France

Résumé

- *Apparues il y a 10 ans comme combinaison de technologies plus anciennes formant le protocole sous-jacent au bitcoin, les blockchains permettent des échanges décentralisés et sécurisés, sans qu'il soit besoin d'un tiers de confiance.*
- *Leurs applications dépassent le cadre strict des cryptomonnaies et sont potentiellement nombreuses mais peu conjuguent, à ce jour, maturité technologique suffisante et pertinence de l'usage.*
- *La recherche doit relever le défi de la capacité des blockchains à monter en charge, ainsi que celui de leur consommation énergétique.*

Mme Valéria Faure-Muntian et M. Claude de Ganay, députés, M. Ronan Le Gleut, sénateur

Contexte de la note

La présente note répond à une demande de la mission d'information commune sur « les usages des *blockchain*s et autres technologies de certification de registres » créée à l'Assemblée nationale. Elle sera suivie d'une note plus développée. Ce qu'on appelle, par métonymie, chaînes de blocs ou *blockchains* sont des **technologies de stockage et de transmission d'informations, permettant la constitution de registres répliqués et distribués, sans organe central de contrôle, sécurisées grâce à la cryptographie, et structurées par des blocs liés les uns aux autres, à intervalles de temps réguliers**.

Pour comprendre le fonctionnement de ces registres informatiques, qui utilisent des réseaux décentralisés pair à pair (*peer to peer*), et forment les technologies sous-jacentes aux cryptomonnaies, type particulier de monnaies virtuelles[1], il est nécessaire de revenir à leurs origines[2].

Aux origines des *blockchains*

L'émergence des cryptomonnaies a partie liée avec le **mouvement pour le logiciel libre**, initié dans les années 1980 par Richard Stallman, ainsi qu'avec la communauté « **cypherpunk** »[3], désireuse d'utiliser les technologies de chiffrement pour créer une monnaie électronique et garantir des transactions anonymes. Les premières tentatives – David Chaum en 1983 avec *e-cash* puis en 1990 avec digicash, Wei Dai en 1998 avec b-money et, surtout, Nick Szabo avec bitgold – sont des échecs. L'invention de *hashcash* par Adam Back en 1997, avait pourtant marqué un progrès avec l'idée de valider les transactions en utilisant les fonctions de hachage cryptographiques, appelées « preuve de travail »[4]. L'objectif de ces technologies est de rendre inutile l'existence d'un « tiers de confiance », en recourant à un système de confiance distribuée permettant de constituer une sorte de « grand livre comptable » infalsifiable.

L'obstacle à lever résidait dans le problème de la double dépense (risque qu'une même somme soit dépensée deux fois) et, plus généralement, dans celui de la tolérance aux pannes, qu'elles soient accidentelles ou malveillantes[5].

La réponse à ces difficultés est apportée en 2008 dans un **article de Satoshi Nakamoto**[6]. Ce dernier y décrit le fonctionnement d'un protocole infalsifiable utilisant un réseau pair à pair – la *blockchain* – comme couche technologique d'une nouvelle cryptomonnaie – le bitcoin.

Le fonctionnement de la *blockchain*

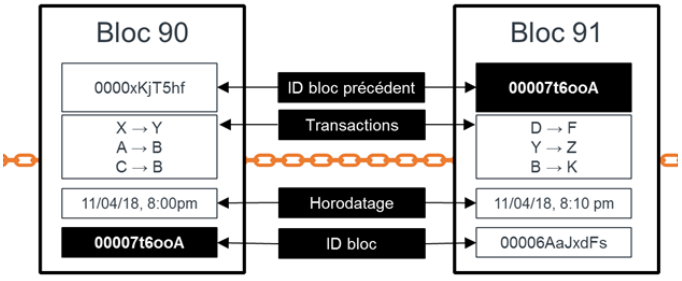
Le bitcoin repose sur un protocole sous-jacent appelé *blockchain*. On parle de chaînes de blocs, ou *blockchains,* car les transactions effectuées entre les utilisateurs du réseau sont **regroupées par bloc**[7]**« horodaté** ».

Une fois le bloc validé, en moyenne toutes les dix minutes, la transaction devient visible pour l'ensemble des détenteurs du registre, potentiellement tous les utilisateurs, qui vont alors l'ajouter à leur chaîne de blocs.

Chaque transaction a recours à la cryptographie asymétrique, apparue avec le protocole Diffie-Hellman de 1976, qui fonctionne avec une paire de clés, l'une privée et l'autre publique, liées entre elles par un algorithme à courbes elliptiques (ECDSA). La clé publique est diffusable et permet de recevoir des transactions, la clé privée est quant à elle gardée secrète. Protéger ses clés privées est le seul moyen de conserver ses bitcoins en sécurité. Dans la mesure où il est possible de retracer toutes les transactions du propriétaire d'une clé publique, il s'agit plus d'un système pseudonyme qu'anonyme. La datation des blocs ainsi constitués est appelée « **horodatage** ».

Chaque bloc, outre les transactions et l'horodatage, possède un identifiant (case à fond noir du bloc 90 dans le schéma ci-dessous), qui prend la forme d'un « ***hash*** » permettant de relier les blocs les uns aux autres[8]. En informatique, le « **hachage** » permet de convertir n'importe quel ensemble de données numériques en un *hash*, c'est-à-dire en une courte suite binaire qui lui est propre. L'algorithme de chiffrement utilisé à cet effet est appelé « fonction de hachage cryptographique ». Le *hash* d'un ensemble de données peut ainsi être comparé à une empreinte digitale, bien moins complexe que l'individu entier, mais l'identifiant de manière précise et unique. Une fonction de hachage est dite « à sens unique » : elle est conçue de telle sorte que le *hash* produit, à savoir une image ou empreinte de taille fixe créée à partir d'une donnée de taille variable, fournie en entrée, est impossible à inverser[9]. Celle utilisée pour le bitcoin est parmi les plus répandues : il s'agit de la fonction *Secure Hash Algorithm-256* (SHA-256), ainsi dénommée car elle produit des *hashs* d'une taille de 256 bits.

La structure d'une *blockchain*



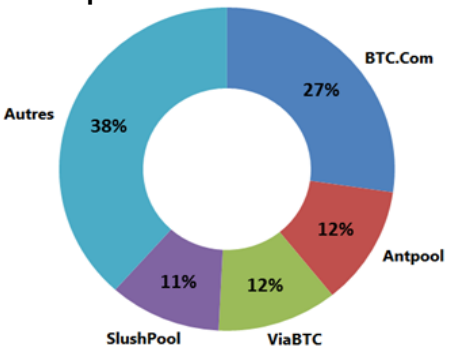
Source : Blockchain France

■ Nœuds du réseau, « mineurs » et consensus

Chaque bloc est validé par certains utilisateurs baptisés « **mineurs** » (en référence aux chercheurs d'or), et sont transmis aux « nœuds » du réseau, c'est-à-dire aux détenteurs du registre, qui l'actualisent en permanence. La validation des blocs permet de se prémunir du risque d'attaques malveillantes[10]. Aucune autorité centrale ne s'en occupe, puisque les utilisateurs s'en chargent en surveillant le système et en se contrôlant mutuellement. Cette sécurité, source de confiance, est l'un des aspects essentiels de la *blockchain*[11]. Le fait que des centaines de copies du registre soient mises à jour simultanément et régulièrement, au terme d'une compétition cryptographique, rend les *blockchains* quasiment indestructibles. Une « **méthode de consensus** » permet de décider qui validera le prochain bloc à ajouter à la chaîne. Dans le cas du bitcoin, elle est appelée « **preuve de travail** » (*proof of work*) car elle suppose la réussite à une épreuve cryptographique dénommée « **minage** », qui se répète en moyenne toutes les dix minutes[12]. Elle consiste en la résolution par les mineurs de problèmes cryptographiques complexes. Ils consistent à obtenir un *hash*, commençant par un certain nombre de zéros, du bloc que le mineur souhaite intégrer. Cette opération, très coûteuse en puissance de calcul informatique, est motivée par l'obtention d'une récompense en bitcoins par le mineur gagnant. Le bloc validé par ce dernier est transmis de pair à pair à chaque nœud qui ajoute à sa propre *blockchain* le bloc ainsi validé. Si deux blocs sont validés au même moment, les mineurs utilisent l'un ou l'autre et **deux chaînes parallèles se développent**. Le protocole prévoit alors que, rapidement, seule **la plus longue subsiste**, c'est-à-dire en pratique celle que la majorité des nœuds aura adoptée.

La **rémunération des mineurs** est complétée par des **frais** prélevés sur les transactions qu'ils intègrent à chaque nouveau bloc. Leur montant est en théorie déterminé librement par les utilisateurs, mais les mineurs sélectionnant en priorité les plus élevés, ces frais varient de fait en fonction du nombre de transactions en attente. L'**organisation des mineurs en groupements** ou « *pools* »[13] induit le risque qu'une majorité organisée oriente la validation des blocs. La confiance des utilisateurs dans le système étant en théorie un objectif partagé par les mineurs, celui-ci est censé suffire à garantir le respect des règles, dans une logique de « main invisible » protégeant les intérêts privés. Il faut cependant souligner que quatre pools dont trois chinois, appuyés sur des « fermes de minage », assurent aujourd'hui plus de 60 % de la puissance de calcul nécessaire à la *blockchain* du bitcoin et pourraient utiliser cette position dominante contre l'intérêt des autres utilisateurs.

Les « pools » de mineurs du bitcoin



Source : Blockchain.info (5-9 avril 2018)

D'autres méthodes de consensus que la « preuve de travail » (*proof of work*) existent et sont souvent plus centralisées[14] : la principale alternative, qui présenterait un risque plus grand d'utilisation malveillante[15], est la « **preuve d'enjeu** », appelée aussi « preuve de participation » *(proof of stake),* basée sur la possession de cryptomonnaies mises en gage, qui se décline à son tour en « preuve de possession » (*proof of hold*), fondée sur la durée de possession, « preuve d'utilisation » (*proof of use*), fonction du volume de transactions, ou encore « preuve d'importance » (*proof of importance*), reposant sur la « réputation ». Deux autres méthodes moins usitées peuvent aussi être évoquées : la « preuve de capacité » (*proof of space*) qui consiste à mettre en gage de l'espace disque disponible, ou encore la « preuve de destruction » (*proof of burn*) qui revient à détruire des cryptoactifs, pour obtenir la confiance du réseau.

Réformer la *blockchain* : *hard* et *soft forks*

Il est possible de modifier les règles régissant une *blockchain*, on parle alors d'embranchement (*fork*). Cela suppose toutefois qu'une modification du code soit intégrée par l'ensemble du réseau. Toute personne peut proposer des modifications mais elles émanent le plus souvent de quelques développeurs (un noyau d'une quarantaine dans le cas du bitcoin). On distingue deux types d'évolutions : les « *soft forks* », lorsque les blocs produits sous la nouvelle version peuvent être ajoutés par des nœuds fonctionnant encore sous l'ancienne version, et les « *hard forks* », lorsqu'une telle rétrocompatibilité est impossible. Lorsqu'ils ne sont pas adoptés à l'unanimité, les *hard forks* peuvent donner naissance à des *blockchain*s alternatives de la version originelle. En 2017, bitcoin cash et bitcoin gold sont ainsi nés de *hardforks* du bitcoin d'origine. Ils peuvent aussi permettre de revenir à un état antérieur de la *blockchain* lorsque celle-ci a été altérée, ce qui pourrait supposer d'annuler les transactions ultérieures.

■ Le défi de la montée en charge (« scalabilité »)

La **capacité à faire face à une augmentation du nombre de transactions** constitue l'un des principaux défis pour les *blockchain*s, à commencer par celle du bitcoin. Cette dernière ne permettait jusqu'en 2017 la validation que de quatre transactions par seconde en moyenne (autour de 20 en 2018). Ce défi de la montée en charge (scalabilité) reste entier. Il a conduit à accélérer la naissance d'autres cryptomonnaies, plus de 1 500 à ce jour, souvent dites alternatives (« *altcoins* »). Il a également mené à des innovations encore peu matures d'un point de vue technologique, comme la parallélisation de *blockchain*s collatérales, aux fonctions différentes et complémentaires (« *sidechains* » pour le bitcoin, « *sharding* » ou « *plasma chains* » sur Ethereum), le recours à des bases de données liées à la *blockchain* (« *side databases* »), ou encore la création d'une nouvelle couche de protocole allégé et rapide « au-dessus » de la blockchain mais bénéficiant de sa sécurité (« *lightning networks* » pour le bitcoin, « *state channels* » sur Ethereum).

■ D'autres applications pour la *blockchain* ?

Le rôle de la *blockchain* en tant que **technologie sous-jacente des nombreuses cryptomonnaies** est aujourd'hui dominant. Cependant, ses protocoles se **déclinent dans de nombreux secteurs** et pourront donner naissance à des applications nouvelles variées, dépassant le cadre strict de la finance : par exemple des services d'attestation et de certification pouvant concerner l'état civil, le cadastre, des contrats de type notarié ou encore des mécanismes de protection de la propriété intellectuelle. Mais peu d'applications conjuguent, à ce jour, pertinence de l'usage et maturité technologique suffisante. La blockchain Ethereum offre une infrastructure adaptée à des outils tels que des codes informatiques qui pourraient s'exécuter après avoir été écrits dans une *blockchain* : *smart contracts*, applications décentralisées dites « Dapps »[16] et organisations autonomes décentralisées ou « DAO »[17].

Programmer la *blockchain* : les *smart contracts*

Les « contrats intelligents » ou *smart contracts* sont des programmes informatiques inscrits dans la *blockchain*. En effet, il est possible d'échanger en son sein des lignes de script, au même titre que des transactions. Ce ne sont pas des contrats au sens juridique, mais des codes informatiques qui facilitent, vérifient ou exécutent un contrat au stade de sa négociation ou de sa mise en œuvre. Par rapport à des programmes classiques, les *smart contracts* présentent l'avantage de bénéficier des caractéristiques particulières de la *blockchain*. Ainsi, leur exécution est irrémédiable et leur code est vérifiable librement par les nœuds du réseau. Ils permettent notamment de placer des fonds sous séquestre de manière vérifiable. Leur mise en œuvre suppose toutefois plusieurs préalables, notamment des mécanismes de vérification approfondis, utiles en raison de l'immuabilité du registre, ainsi que le développement d'un langage de programmation adapté aux contraintes de volume de données propres à un réseau distribué. Par ailleurs, l'exécution de la plupart des cas d'usage annoncés, est conditionnée par l'apport et l'export d'informations. Que ce soit pour relever une température, livrer un colis, prouver la réalisation d'un travail, ou donner l'heure d'arrivée d'un avion, un tiers, qualifié d'oracle dans l'écosystème Ethereum, doit faire le lien entre la *blockchain* et le reste du monde, ce qui s'apparente au retour d'un « tiers de confiance ».

La distinction entre *blockchains* ouvertes ou publiques et *blockchains* fermées ou privées

La distinction *blockchains* publiques/*blockchains* privées **ne repose pas sur une distinction entre *blockchains* de personnes publiques** (États, collectivités…) **et *blockchains* de personnes privées** (entreprises, ONG…), **mais sur le caractère ouvert ou fermé de la *blockchain***, les protocoles de chaînes de blocs pouvant être distingués selon qu'ils sont ouverts à l'écriture et à la lecture sans restriction ou que l'une ou l'autre de ces opérations est soumise à l'acceptation d'un tiers. On parlera de *blockchains* ouvertes (*permissionless*) ou fermées (*permissioned*) ou encore de *blockchains* publiques ou privées.

Les protocoles de *blockchains* sans restriction d'accès sont les plus connus. Ils soutiennent le bitcoin ou l'ether. Comme il a été vu, n'importe qui peut en devenir un nœud, et ces protocoles nécessitent une méthode de consensus.

Il existe aussi un grand nombre **de protocoles à restriction d'accès**, pour certains particulièrement aboutis et déjà opérationnels. Parmi ces derniers, les *blockchains* « de consortium » résultent du regroupement de plusieurs organisations indépendantes, voire concurrentes, utilisant la *blockchain* pour archiver dans un registre décentralisé des transactions sécurisées, ou échanger des actes certifiés, sans avoir à faire intervenir un tiers de confiance. D'autres protocoles sont utilisés au sein d'une même organisation, pour simplifier et automatiser des échanges et des certifications. Dans une *blockchain* privée, une autorité régulatrice valide l'introduction de nouveaux membres, et accorde les droits en écriture et en lecture. Cette autorité peut être seule aux commandes, ou gouvernée collégialement par les différents participants. À la différence d'une *blockchain* publique, les *blockchains* privées peuvent exiger une majorité renforcée. De même, il suffit de trois participants pour faire fonctionner une *blockchain* privée, tandis que les *blockchains* publiques sont appelées à en compter plusieurs milliers.

Un débat existe pour qualifier les *blockchains* privées de « vraies » ou de « fausses » *blockchains*, sachant que créer un produit recourant à ces technologies est aussi un **enjeu de marketing**. Le recours de certaines applications aux *blockchains* ne semble pas toujours justifié, les fonctionnalités offertes par les bases de données partagées et sécurisées existantes apparaissant en effet suffisantes à leur réalisation, alors que des technologies alternatives de registres distribués sont en développement : *hashgraph*, *tangle* ou *directed acyclic graph* (DAG).

Le succès de certaines levées de fond spécifiques à l'écosystème des cryptomonnaies (*Initial Coin Offering* ou ICO) interroge également. Ces émissions d'actifs numériques (appelés jetons ou *tokens*) échangeables contre des cryptomonnaies ont représenté plus de 3 milliards de dollars en 2017, ce qui peut sembler peu rationnel puisqu'elles n'offrent aucune garantie aux investisseurs.

Un regard plus distancié paraît nécessaire, en raison des **effets de mode propres aux écosystèmes entrepreneuriaux**. Ces effets de mode, visibles dans le recours à certains concepts, tels que les technologies disruptives, l'intelligence artificielle, les données massives (*big data*), le *cloud*, l'internet des objets (IoT pour *internet of things*) ou, encore, la *blockchain,* sont parfois le reflet de stratégies marketing séduisantes, mais sans toujours s'accompagner d'innovations aussi majeures que celles annoncées.

Les enjeux énergétiques et environnementaux

Outre les questions de montée en charge, de sécurité, de régime fiscal, ou de cadre juridique, les *blockchains* posent aussi celle, essentielle, de leurs impacts énergétiques et environnementaux. Les besoins en électricité des *blockchains* fondées sur la preuve de travail sont considérables.

Leur estimation fait l'objet de débats mais la consommation pour le seul bitcoin est d'au moins **24 TWh/an**[18]. La dépense énergétique étant corrélée à l'intéressement des mineurs, sa croissance est quasi-exponentielle[19]. Face à l'explosion des cours, la réduction par deux tous les quatre ans des récompenses de minage (phénomène appelé « *halving* »)[20] apparaît insuffisante pour jouer son rôle de régulation de la compétition. De meilleures capacités de calcul ou l'utilisation de surplus électrique ne permettront pas de diminuer la consommation énergétique. En effet, la compétition se jouant sur les coûts, les économies offertes aux mineurs le sont aussi aux attaquants potentiels.

L'impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre est d'autant plus important que les groupements de mineurs sont surtout établis en Chine, pays qui présente l'intensité carbone la plus élevée au monde[21]. La recherche doit donc **relever ce défi de la consommation énergétique** des *blockchains*, à l'image de l'initiative française BART[22] (« *Blockchain* Advanced Research & Technologies »), qui doit permettre de valider la *blockchain* en consommant moins d'énergie, par des méthodes de consensus robustes aux moyens cryptographiques avancés, tout en développant de nouvelles architectures facilitant la fiabilité et la montée en charge du réseau.

Sites Internet de l'Office :

http://www.assemblee-nationale.fr/commissions/opecst-index.asp

http://www.senat.fr/opecst

Références

(1) Les monnaies virtuelles n'ont pas de cours légal, ne sont pas régulées par une banque centrale et ne sont pas délivrées par des établissements financiers. La Banque centrale européenne en distingue trois : celle des jeux vidéo (existence limitée au cadre du jeu), celle utilisant un flux unidirectionnel (elle peut être achetée avec une devise légale mais ne peut être reconvertie en monnaie légale) et, enfin, celle bénéficiant d'un flux bidirectionnel, comme les cryptomonnaies à l'instar du bitcoin (possibilité de conversion dans les deux sens).

(2) La compréhension de l'histoire et du fonctionnement de ces technologies peut s'appuyer sur les ouvrages suivants : Don et Alex Tapscott « Blockchain Revolution » éditions Penguin Random House ; collectif « La Blockchain décryptée – les clefs d'une révolution » Blockchain France ; Jacques Favier et Adli Takkal-Bataille « Bitcoin » CNRS édition ; Laurent Leloup « Blockchain : La révolution de la confiance » éditions Eyrolles ; Stéphane Loignon « Big Bang Blockchain » éditions Tallandier ; collectif « Bitcoin et Blockchain : vers un nouveau paradigme de la confiance numérique ? » Revue Banque édition ; IEEE Spectrum « Blockchain World », éditions IEEE ; collectif U « Comprendre la blockchain » éditions Uchange ; National Institute of Standards and Technology « Blockchain Technology Overview » U.S Department of Commerce ; Andreas Antonopoulos « Mastering Bitcoin : programming the open blockchain » éditions O'Reilly, disponible en français sur ce lien. Les sites suivants peuvent aussi être cités : www.bitcoin.org https://bitcoin.info www.coindesk.com https://cointelegraph.com https://blockchainfrance.net https://blockchainpartner.fr et https://journalducoin.com. TA-SWISS, fondation suisse pour l'évaluation des choix technologiques, membre du réseau EPTA, rendra prochainement une étude sur la blockchain.

(3) Le mot-valise « cypherpunk », inventé par Jude Milhon, est formé à partir de l'anglais cipher ou chiffrement et « cyberpunk », lui-même issu des mots cybernétique et punk et renvoyant à des œuvres de fiction dystopiques basées sur les technologies. Tim May publie un « Manifeste crypto-anarchiste » en 1992 et Eric Hughes le suit en 1993 avec son « Manifeste d'un Cypherpunk ».

(4) Les premières preuves de travail sont apparues dès 1992 avec les travaux de Cynthia Dwork and Moni Naor.

(5) La réponse informatique à ces pannes revient à résoudre le problème des généraux byzantins, cf. Leslie Lamport, Robert Shostak et Marshall Pease « The Byzantine Generals Problem », ACM transactions on programming languages and systems, vol.4, n°3, juillet 1982.

(6) Satoshi Nakamoto est le pseudonyme du collectif des fondateurs du bitcoin et de la première blockchain. Il a désigné Gavin Andresen, CTO de la Fondation Bitcoin, comme étant son successeur. Le fonctionnement de cette crypto-monnaie et de la blockchain est décrit dans un article fondateur publié sur internet en 2008 : « Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System » (traduction en langue française).

(7) En 1991, Stuart Haber et W. Scott Stornetta furent les premiers à proposer une chaine de blocs permettant l'horodatage : lien de l'article

(8) Les arbres de hachage ont été inventés par Ralph Merkle en 1979, d'où l'expression « arbre de Merkle ». Dans le cas du bitcoin ils permettent de réaliser un hash de l'ensemble des transactions d'un bloc, qui est appelé « racine de Merkle » (Merkle Root). L'empreinte de ce bloc résulte alors du hash de cette racine combinée à l'empreinte du bloc précédent.

(9) Alors qu'il est simple de produire un hash à partir d'un ensemble de données, il est quasi-impossible de remonter à un ensemble de données à partir d'un hash connu avec les puissances de calcul disponibles aujourd'hui. Cette fonction est « à sens unique » car l'image d'une donnée se calcule facilement mais le calcul inverse est impossible en pratique. En effet, il existe 2^{256} hashs différents.

(10) Les attaques « Sybil » reposent sur la multiplication de fausses identités, ce qui peut conduire certains acteurs à exercer une influence disproportionnée sur un réseau. Se prémunir de ces attaques suppose de contrôler la création de profils (validation d'une identité par courriel par exemple) ou, en l'absence d'autorité de contrôle, de produire des calculs informatiques complexes, comme c'est le cas pour le bitcoin.

(11) On parle à son sujet d'un mécanisme de confiance, « trust machine » comme titrait la revue The Economist en octobre 2015. Ce numéro spécial blockchain permit à cette dernière de « sortir » du milieu des spécialistes, grâce à la réputation de cette revue, et de se voir conférer une crédibilité dans le grand public, notamment auprès des acteurs économiques. Le sous-titre du même numéro de cette revue, « comment la technologie derrière le Bitcoin pourrait changer le monde », évoque quant à lui la révolution potentielle induite par la blockchain.

(12) La « preuve de travail » consiste en un calcul itératif et aléatoire, sa résolution peut donc être plus ou moins longue, mais sa difficulté peut être ajustée de telle sorte que le temps moyen de résolution soit proche d'une durée donnée. Pour le bitcoin, elle est de 10 minutes, sa difficulté étant ajustée tous les 2016 blocs, c'est-à-dire environ tous les 14 jours. La difficulté des fonctions de hachage doit progresser au même rythme que l'évolution des puissances de calcul informatique.

(13) L'appartenance à un pool assure des revenus plus constants aux mineurs. On peut relever l'existence de trois pools d'envergure modérée en France : Big Block Data, Wizard Mining et Just Mining.

(14) La crypto-monnaie peercoin mélange la preuve de travail et la preuve de participation, c'est-à-dire qu'elle adapte la difficulté du travail de minage en fonction de la « part » de crypto-monnaie possédée par chacun des mineurs. La crypto-monnaie nem utilise la preuve d'importance et l'ether a vocation à reposer sur une preuve d'enjeu mais la transition depuis la preuve de travail a du mal à se confirmer depuis deux ans : sa blockchain reste fondée sur la preuve de travail. Tezos est un autre projet qui vise aussi l'utilisation de la preuve d'enjeu.

(15) Des solutions plus résistantes sont en cours de développement. Silvio Micali, titulaire du prix Turing 2012, propose ainsi le système Algorand dont le fonctionnement correct malgré la présence d'un tiers de nœuds malveillants est prouvé mathématiquement.

(16) Les applications décentralisées, qui sont en réalité distribuées, fonctionnent grâce à des programmes inscrits sur la blockchain. Leur utilisation nécessite toutefois l'intervention d'un tiers.

(17) Les DAO sont des organisations collectives dont les règles de fonctionnement et les procédures sont inscrites sur la blockchain.

(18) Parmi les estimations proposées en avril 2018 pour le minage du bitcoin seul, Bloomberg indique 20 TWh/an, Digiconomist, 60 TWh/an et Morgan Stanley, 140 TWh/an. Une estimation minimale peut être réalisée à partir des performances de la machine la plus efficace du marché, Antminer S9 ($13{,}5*10^{12}$ hashs/s pour une consommation de 1 323 W) et du nombre global de calculs de hashs ($28*10^{18}$ hashs/s) pour le bitcoin le 4 avril 2018. Cela représente 2 millions d'appareils, soit une consommation de 2,7 GW, c'est à dire 24 TWh par an.

(19) Le Bitcoin Energy Consumption Index indique ainsi une augmentation de 30 % de la consommation énergétique au cours du mois de mars 2018. Pour suivre l'estimation du Digiconomist au jour le jour : lien. Karl J. O'Dwyer et David Malone ont montré, dans une étude publiée en 2014, que la consommation du réseau destiné au bitcoin se situait alors dans une fourchette entre 0,1 et 10 GW de puissance électrique et qu'elle serait probablement de l'ordre de grandeur de la consommation d'un pays comme l'Irlande, soit environ 3 GW.

(20) Le protocole de Nakamoto prévoit en effet que la récompense en bitcoin attribuée à chaque mineur validant un bloc soit divisée par deux tous les 210 000 blocs, c'est-à-dire tous les 4 ans. Elle était ainsi de 50 bitcoins jusqu'en 2012, puis de 25 jusqu'en 2016, elle est aujourd'hui de 12,5 et passera à 6,25 en 2020. Elle est versée 100 blocs après validation.

(21) La Chine présente, selon les calculs du GIEC, l'intensité carbone la plus élevée du monde, avec 1 050 grammes de CO_2 par kWh d'électricité produite.

(22) Cette initiative commune de recherche réunit l'INRIA, Télécom ParisSud, Télécom ParisTech et SystemX.

Experts consultés

M. Gérard BERRY, professeur au Collège de France, membre du conseil scientifique de l'Office

Mme Emmanuelle ANCEAUME, chargée de recherche en informatique à l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires (Irisa/CNRS/INRIA/IMT Atlantique/ENS Rennes/INSA Rennes/CentraleSupelec/Université de Bretagne Sud/Université de Rennes 1)

M. Daniel AUGOT, directeur de recherche à l'INRIA

Mme Claire BALVA, présidente de *Blockchain* France et de *Blockchain* Partner

M. Nicolas COURTOIS, professeur d'informatique au University College London (UCL)

M. Jean-Paul DELAHAYE, professeur émérite en informatique à l'Université Lille I (Centre de recherche en informatique, signal et automatique de Lille/CRISTAL)

M. Gilles FEDAK, chargé de recherche à l'INRIA et président d'iExec

M. Georg FUCHSBAUER, chargé de recherche à l'École normale supérieure de Paris et à l'INRIA

M. Fabrice LE FESSANT, chargé de recherche à l'INRIA et fondateur de OCamlPro, Move&Play et CleverScale

M. Renaud LIFCHITZ, consultant et chercheur en sécurité informatique et en cryptographie

M. Gérard MEMMI, responsable du département Informatique et Réseaux de Télécom ParisTech

M. Ricardo PEREZ-MARCO, directeur de recherche en mathématiques (CNRS/Université Paris Diderot)

M. Simon POLROT, avocat, fondateur d'Ethereum France et de VariabL

M. Pierre PORTHAUX, président de *Blockchain* Solutions et d'EmergenceLab

M. Manuel VALENTE, directeur de la Maison du Bitcoin