

L'intégration de la Blockchain dans l'industrie spatiale : une perspective managériale

Mémoire de recherche dirigé par : Victor Dos Santos Paulino

Master 2 – PGE – OP Management de l'Innovation High Tech

Remise : Lundi 3 février 2020

AMROUN Emilie

BARET Paul

L'intégration de la Blockchain dans l'industrie spatiale : une perspective managériale

Résumé / Abstract

Résumé :

Ce mémoire traite de l'intégration de la blockchain dans une industrie à forte composante technologique : l'industrie spatiale. Cette étude a pour but dans un premier temps de développer une réflexion quant aux usages et applications diverses de la blockchain sous sa forme dite privée. Elle a aussi pour but de faire un point sur l'évolution des technologies dans le secteur ainsi que ses tendances managériales.

Constatant que la blockchain n'avait pu à ce jour pénétrer l'industrie spatiale, nous proposerons un point d'entrée identifié en fonction des enjeux du secteur. Nous justifierons les usages potentiels de cette technologie en fonction de sa valeur ajoutée.

Abstract:

This dissertation discusses about the integration of blockchain technology in a high tech industry: Space industry. This study has several purposes. The first one would be to develop diverse use cases and applications of blockchain in a managerial context. The second one is to look around the technologies evolution in space industry as well as managerial trends.

Considering that blockchain has not been adopted yet through the space sector, an entry point will be proposed corresponding to the key issues of the space industry ecosystem. Potential applications and use cases of blockchain technologies will be justified according to their added value.

Mots clés : IoT, blockchain, spatial, chaîne logistique, technologie,

Table des matières

1) Introduction	4
2) La blockchain	5
1. La technologie.....	5
1.1) Concepts et principes.....	5
2. Une blockchain adaptée aux organisations.....	6
2.1) Le modèle de blockchain privée.....	6
2.2) Les smart contracts	8
3. Les applications et limites	8
3.1) Les enjeux économiques	8
3.2) Les limites à l'implémentation	9
3) L'industrie du spatial	10
1. Présentation : acteurs, concurrence, domaine.....	10
1.1) Focus sur la filière française.....	11
1.2) Les applications	11
1.3) L'enjeu majeur du secteur : le « New Space »	12
2. Applications techniques de la blockchain dans l'industrie spatiale	13
3. La gestion managériale du secteur	13
3.1) Les ressources humaines	14
3.2) La gestion de la chaîne logistique	15
4) Modèle conceptuel	15
1. Technologie intégrée au produit.....	16
2. Technologie intégrée au mode de gestion de l'industrie : l'usine 4.0	17
5) Conclusion	19
1. Implication managériale	19
2. Limites de cette étude.....	20
3.	
6) Bibliographie	21

1) Introduction

Nous vous présentons notre mémoire de recherche parachevant notre année de Master 2 du programme grandes Écoles de Toulouse Business School. Il retranscrit une réflexion portant sur la place de la blockchain au sein du secteur spatial. Le choix de ce sujet a été conduit par une volonté mutuelle de comprendre les différents usages d'une technologie ambitieuse et d'analyser les grandes tendances d'une industrie hautement innovante. Proposé par le chair SIRIUS, ce sujet va nous mener à contribuer à l'analyse de faisabilité d'intégrer la blockchain au secteur spatial.

L'industrie du spatial est une industrie hautement technologique pour laquelle il est nécessaire de qualifier la qualité et l'efficacité des solutions proposées. Les acteurs traditionnels et bien installés semblent rentrer dans une nouvelle ère de lutte avec de nouveaux entrants redéfinissant les solutions et les usages. L'industrie fait face aux évolutions rapides des technologies et au dilemme de suivre la technologie ou non. Celui d'être précurseur de la technologie ou suiveur. Les dernières grandes innovations comme les lanceurs réutilisables ou les constellations de mini satellites (small sat) par exemple ont re-dynamisé une industrie traditionnelle parfois vieillissante.

La blockchain s'est illustrée avec l'ascension des crypto-monnaies et de leurs écosystèmes. Aujourd'hui cette technologie a de nombreux usages dans la sphère professionnelle afin de répondre à des problématiques technologiques et managériales essentielles. Parfois mal comprise, elle jouit en tout état de cause de capacités profitables pour l'industrie spatiale telles que la confidentialité, l'immutabilité et la transparence.

On peut donc se demander comment évoluent les technologies dans le domaine spatial? Quels sont les domaines d'application technique de la blockchain dans l'industrie spatiale ? Comment la blockchain répond-elle à une problématique de science de gestion ? Enfin à quel niveau de l'entreprise la blockchain pourrait-elle être intégrée dans le domaine du spatial ?

Pour répondre à ces questions nous avons décidé dans un premier temps d'évaluer et d'analyser la blockchain en tant que technologie au service d'une ou plusieurs entreprises en réseau. Nous présenterons ensuite l'industrie du spatial afin de connaître l'état actuel de ce secteur ainsi que ses tendances et évolutions à venir. Nous présenterons enfin le fruit de notre réflexion portant sur le lien le plus franc que nous avons pu identifier entre la technologie et le secteur.

2) La blockchain

1. La technologie

La blockchain est une technologie de réseau entre différents usagers, appelées noeuds. Il s'agit d'un cahier numérique sécurisé, décentralisé et partagé entre les noeuds. Lorsque l'un d'entre eux souhaite inscrire un nouvel élément dans le registre, tous les autres opérateurs de la blockchain sont invités à participer à la validation de ce nouvel ajout afin qu'il soit enregistré de façon indélébile. Sous forme de bloc, les nouveaux éléments qui viennent enrichir la chaîne contiennent l'empreinte du bloc précédent afin de garantir que la base de données s'articule bel et bien suivant une chaîne. Ce maillage exclut donc par essence les nouvelles entrées qui seraient antidatées ou falsifiées car la blockchain est partagée entre tous les noeuds du réseau.

1.1) Concept et principes

Suite à la révolution numérique, la plupart des échanges au sein de nos économies sont tout ou partie dématérialisés. Du troc d'antan à la vente par internet aujourd'hui, tout repose sur de l'information afin de caractériser ce que l'on se transmet, à qui, quand, comment, combien, etc... Alors qu'hier elles étaient orale et conclue par la séculaire poignée de main, les transactions sont aujourd'hui numérisées afin de décupler notre capacité à échanger toutes sortes de choses et avec n'importe qui. Dans ce contexte opaque entre des acteurs qui ne peuvent contrôler cette masse d'information volatile et déchaînée, des organismes ont pour rôle de réguler ces échanges afin de limiter les risques. Les Etats, les banques, un office notariale et d'autres encore contrôlent les échanges et se chargent des contentieux.

Le secteur privé repose aujourd'hui sur la numérisation des informations, sur la mondialisation des marchés et sur l'instantanéité de leurs échanges. Chaque acteur doit alors se prémunir de différents risques, établir des garde-fous. Le plus souvent, c'est en ayant recours à des intermédiaires que l'on s'assure de la validité et de la fiabilité de nos transactions avec un tiers. Malgré la sécurité qu'il offre, cet intermédiaire peut ralentir l'échange par sa vérification; facturer sa prestation, commettre des erreurs accidentelles ou même falsifier les informations volontairement. La blockchain offre alors la possibilité de désintermédier les échanges.

Les parties prenantes ont accès à une base de données qui enregistre toutes les transactions et leurs caractéristiques. Pour fonctionner sans intermédiaire de confiance, la blockchain repose sur un registre sous forme d'une chaîne de blocs et sur une gestion collaborative de ce dernier (Berbain 2017). Lorsqu'un échange a lieu, il est renseigné dans la blockchain. Elle assemble alors un nouveau bloc décrivant la transaction et l'ajoute à la chaîne par un procédé cryptographique reposant sur une fonction de hash dans la plupart des cas. Le bloc se retrouve alors en bout de chaîne jusqu'à ce qu'à nouveau, un autre bloc soit ajouté. En effet, tous les usagers ont la

possibilité d'assembler de nouveaux blocs. Il leur incombe également de valider les nouveaux blocs par différents processus comme le proof of work ou le plus récent proof of stake. Un bloc validé ne pourra plus être modifié, ce qui garantit l'immutabilité des données inscrites. La validation des nouveaux blocs est donc l'un des 4 éléments structurant toute blockchain (Berbain 2017). Afin de se prémunir de toute falsification du registre, chaque bloc est validé par consensus entre les parties prenantes de la chaîne. Le second élément structurant d'une blockchain est d'utiliser un registre. C'est une forme de stockage décentralisée pouvant recenser des informations de toutes natures. La blockchain la plus fameuse, celle du Bitcoin enregistre des transactions monétaires (blockchain 1.0). Or nous montrerons par la suite que des informations de forme bien différente peuvent être assemblées (blockchain 2.0). Troisième nœud de toute blockchain, l'accès au registre doit permettre de déterminer qui peut intervenir, modifier, consulter, valider des blocs et si ce sont des personnes physiques ou morales. L'ultime élément structurant est la régulation des acteurs. Il s'agit d'inciter chaque utilisateur à participer à la chaîne et à la validation des blocs. Ce dernier point explique que le plus souvent, une blockchain repose sur une cryptomonnaie permettant de récompenser les usagers moteurs de la chaîne.

2. Une blockchain adaptée aux organisations

2.1) Le modèle de Blockchain privée

Une blockchain permet à ses utilisateurs d'avoir accès à n'importe quelle transaction passée, avec la garantie que celle-ci n'a pas été manipulée depuis la validation du bloc dans lequel elle figure. Ces concepts d'auditabilité de transparence avec tous les usagers peuvent répondre à certaines règles dans le cadre d'une blockchain privée. Par opposition à la forme publique, une blockchain privée catégorise ses usagers afin de leur allouer des droits différents quant à l'exploitation de la blockchain et de ses données. Ainsi de nouvelles formes de coopérations peuvent naître entre des partenaires utilisant une même blockchain. Des collaborateurs de différents services, de différentes entreprises ont pour certains un accès consultatif afin d'accéder aux données inscrites sur la partie validée de la chaîne. D'autres seraient, exclusivement ou non, autorisés à proposer de nouveaux blocs que des usagers déterminés seraient eux-seuls aptes à valider. On distingue le plus souvent, les mineurs des utilisateurs. Les mineurs cherchent à valider de nouveaux blocs quand les utilisateurs ont accès à la chaîne et peuvent librement soumettre de nouvelles transactions. Dans le cadre d'une blockchain privée, la gouvernance de celle-ci attribue les rôles et contrôle l'accès aux données de chacun. Elle est également en charge de mobiliser les mineurs pour qu'ils participent à la validation des nouveaux blocs. Comme nous l'avons vu, le processus de validation est basé sur un consensus qui sera plus fiable et sécurisé si le nombre de mineurs et leurs ressources augmentent. Une contrepartie doit donc être prévue par la gouvernance pour veiller sur la diversité des mineurs dans leur travail de sécurisation. Ce problème peut être minimisé dans le cadre d'une blockchain privée

au sein d'une entreprise ou d'une chaîne logistique par exemple en fixant le nombre de mineurs et leurs ressources et en veillant à leur impartialité. Ce dernier point étant grandement facilité dans le cas où des machines font office de mineurs. En outre, aucune rémunération n'est alors nécessaire et seul le coût de fonctionnement des machines valideuses n'est à prendre en compte.

La gouvernance d'une blockchain privée demeure aisée puisque les données stockées demeurent confidentielles. Un nombre limité d'acteurs y a accès, elles répondent à des besoins et usages spécifiques et les responsabilités de chaque usager sont clairement identifiables en cas de litige. Nous aborderons le contexte juridique à peine émergeant autour de la blockchain plus loin dans notre étude. A noter que si les partenaires sont régis par le même droit national, certains avocats se sont d'ores et déjà spécialisés en la matière.

Les premières blockchain en service souffraient d'un temps de validation de parfois plusieurs minutes pour chaque nouveau bloc comportant pour chacun d'entre eux une dizaine de transactions tout au plus. Le modèle du bitcoin dont la validation est basé sur le proof of work en est un exemple. Ce mécanisme de validation est basé sur un problème mathématique dont la durée de résolution est fixée à 10 minutes. Si la puissance de calcul des mineurs augmente, la complexité du calcul est renforcée pour maintenir un délai de validation fixe. Cette méthode a pour avantage de minimiser le risque d'attaques malveillantes de la chaîne mais demande des outils informatiques de plus en plus énergivores. Dans le cas des blockchains privées, il existe aujourd'hui deux mécanismes de validation, le proof of stake utilisé dans le cas de l'Ethereum et le delegated proof of stake, aujourd'hui le plus rapide des processus de validation. Le proof of stake consiste à donner le pouvoir de validation à des acteurs proportionnellement à leur implication dans la chaîne (par exemple nombre de blocs validés, nombre de transactions émises...). Pour un chiffre X traduisant l'implication d'un acteur, la probabilité que ce soit lui qui valide le prochain bloc est $X/\text{Implication totale des acteurs de la chaîne}$. Le delegated proof of stake reprend le même principe en confiant ce pouvoir à des valideurs choisis et en nombre restreint. Le nombre de valideurs désignés aura évidemment une incidence sur la centralisation de la chaîne. La blockchain utilisant ce protocole comptant le plus grand nombre de valideurs est Bitshares avec 101 valideurs. N'avoir qu'à compter sur une poignée de mineurs de confiance pour valider les blocs et donc les transactions, permet de réduire le temps de validation à quelques secondes, de rendre la chaîne aisément scalable en augmentant si besoin le nombre de valideurs, de prendre des décisions sans avoir à obtenir un consensus avec tous les utilisateurs de la chaîne et de maintenir une protection efficace contre les attaques. Dans le cas d'une blockchain privée de taille raisonnable et faiblement exposée aux attaques extérieures, l'algorithme PBFT (pour Practical Byzantine Fault Tolerance) permet de charger un seul acteur appelé leader, une machine, de la validation des blocs de la chaîne.

2.2) Les smart contracts

Les smart contracts sont des contrats digitalisés intelligents stockés et activés sur une blockchain. Lorsque les conditions de réalisation du contrat sont réunies, c'est-à-dire inscrites dans la chaîne et validées, l'exécution du contrat est alors automatique. C'est une suite de codes qui va caractériser le contrat, son objet, la qualité des parties etc. Les entités utilisatrices de la même blockchain ont accès au code du contrat et peuvent ainsi décider ou non de s'engager en fonction de la contrepartie. Elles sont certaines que le contrat se réalisera bel et bien puisque le code de ce dernier est déjà inscrit dans la chaîne. L'ensemble du processus qui mène à la résolution du contrat est en outre accessible et vérifiable puisque donnant lieu à une transaction validée automatiquement sur la blockchain afin de se prémunir de toute réclamation de la part d'un autre utilisateur. A noter que certaines blockchains expérimentales ne reposant que sur l'enregistrement de l'ouverture ou de la fermeture de smart contracts permettent des millions de transactions par seconde.

En premier lieu, ce sont les relations contractuelles entre partenaires qui pourraient se voir réinventées. En effet, les smart contracts permettent de réduire les coûts de documentation et de contractualisation tout en sécurisant les échanges avec un fournisseur par exemple. Ce dernier point permettrait d'élargir son cercle de partenaires sans compromettre la solidité de sa chaîne logistique, de production ou de conception.

Les smart contracts et leurs conséquences juridiques et organisationnelles donnent lieu à de nombreux travaux aujourd'hui.

3. Les applications et les limites

3.1) Les enjeux économiques

Parmi les nombreux cas d'usages et domaines d'application, la première manifestation de la technologie de la blockchain est le Bitcoin. C'est donc le secteur de la finance qui reste moteur des investissements en matière de blockchain avec 210 milliards de dollars pour la seule année 2016. Les secteurs de l'énergie, du commerce (oeuvres d'arts et diamants entre autres), des transports et de la logistique, de la gestion des droits numériques, de la santé et de l'administration sont les principaux domaines à proposer de nouveaux services basé sur une technologie de blockchain. Les avantages recherchés sont en général le suivi des transactions et de leur traçabilité ainsi que la lutte anti-fraude.

Selon Waelbroeck, 2017, il existe 3 raisons de croire en l'avenir de la technologie selon 3 domaines d'application à forte valeur ajoutée. La première est la sécurité qu'offre la blockchain, la deuxième est la décentralisation des relations entre agents

et la troisième et dernière concerne les capacités de tracking d'objets offertes par une blockchain.

L'enjeu de cybersécuriser ses données pour les entreprises doit mener à une réflexion quant aux perspectives d'un système décentralisé incitant chaque partie-prenante à sécuriser le registre commun et le réseau. La chaîne étant copiée par chaque nœud du réseau, il ne s'agit plus d'attaquer le noyau du système, comme un serveur de stockage mais de perturber le plus grand nombre de nœuds. Ici la protection réside en différents algorithmes de validation des blocs que nous avons survolé plus haut.

Le secteur privé s'articulant autour d'écosystèmes d'entreprises parfois mondialisés, le second enjeu auquel la blockchain peut répondre est de mettre en relation les agents via un réseau sécurisé et décentralisé. La première conséquence est de réduire drastiquement les barrières à l'entrée en matière de ressources informatiques pour prétendre à fonder de nouveaux partenariats. En effet les moyens tels que les serveurs, le matériel et les logiciels sont partagés entre les nœuds du réseau. La blockchain est donc une issue à la course aux ressources numériques menée par les géants de l'informatique. Finalement, sans aller jusqu'à ce que la recherche qualifie de liquéfaction de l'économie proposant un nouveau modèle d'entreprise décentralisée (DAO), les smart contracts auront certainement une incidence importante sur les environnements externes (partenariats et contractualisation) et internes (contrats de travail) des entreprises.

Le troisième domaine d'application de la blockchain répond aux problématiques de traçabilité. En permettant de tracer et d'authentifier des biens ou des personnes au sein d'un réseau grâce à des techniques d'empreintes, de reconnaissance numérique et de capteurs, une blockchain peut structurer un réseau IOT par exemple. A l'aide de passeports numériques, un objet physique peut être suivi dans une chaîne logistique et son parcours peut être automatisé à l'aide de smart contracts.

3.2) Les limites de l'implémentation

Nous aborderons les 4 freins majeurs à l'adoption de la blockchain en entreprise. Il existe en effet des obstacles supplémentaires dans le cas de l'adoption d'une blockchain publique comme son coût énergétique que nous avons choisi de ne pas développer ici.

Les transactions au sens large inscrites dans un registre distribué via une blockchain sont regroupées au sein de blocs maillés les uns à la suite des autres. La chaîne du bitcoin fixe à 7 le nombre de transaction par seconde, le réseau VISA peut quant à lui absorber et traiter près de 56 000 transactions par seconde. Afin d'enregistrer un grand nombre de transaction à la fois, on pourrait imaginer des blocs très volumineux or ils risqueraient d'engorger la chaîne. Par exemple, la chaîne du Bitcoin limite la taille des blocs à 1 Mo. Aussi, un bloc devant être enrichi à son maximum avant d'être soumis à validation imposerait un temps de latence pour qu'un nombre suffisant de transactions y soient enregistrées. Les premières transactions inscrites devraient alors patienter avant d'être validées par la chaîne. Comme vu

précédemment, des mécanismes existent pour assurer un important nombre de transactions par seconde et particulièrement dans le cas de blockchains privées.

Structurellement, un temps de latence est nécessaire pour propager un nouveau bloc depuis un nœud du réseau vers l'ensemble des agents suite à sa validation. Il est en moyenne de 12 secondes pour les chaînes publiques. On comprend ici aisément qu'automatiser un système à partir d'une blockchain serait contre-productif si chaque opération n'était déclenchée que 12 secondes après que la consigne lui ait été donnée. Ici encore, des solutions existent dans le cadre d'une chaîne privée dont certains nœuds choisis en nombre restreint communiqueraient en priorité entre eux afin de limiter la diffusion des blocs puis de les transmettre aux nœuds voisins.

La blockchain est une technologie dont la supériorité aux attaques conventionnelles que peut subir un réseau numérique est reconnue. Cependant de nouveaux types d'attaques dédiées aux vulnérabilités de la blockchain sont apparues (attaque des 51%, déni de service...). Les mécanismes de validation des blockchain publiques paraissent souvent complexes, longs et énergivores. Ils répondent en réalité à ces enjeux de sécurité et jouent le rôle de rempart contre différentes attaques. Il est à noter que la plupart des attaques possibles d'une blockchain implique d'en être partie prenante. Dans le cas d'une blockchain privée limitant son accès, le risque de vulnérabilité chute.

Le Bitcoin a participé à l'explosion du phénomène blockchain. En proposant une monnaie parallèle non régulée, le Bitcoin est devenu un symbole d'émancipation des grandes banques et autres mécanismes de contrôle. Cependant, suite à de nombreux scandales et des perspectives qui ne sont plus aussi limpides que quelques années auparavant, le Bitcoin et donc la blockchain sont plutôt perçus comme un réseau de blanchiment d'argent et un moyen de se procurer nombre de denrées illégales sur le deep web. Il est donc primordiale de distinguer la technologie de certains de ces usages.

3) L'industrie du spatial

1. Présentation : acteurs, concurrence, domaine

L'industrie du spatial représente la fabrication d'une partie ou de l'ensemble d'un systèmes spatial. Cette industrie regroupe à la fois des entreprises du secteur privé ainsi que des agences et institutions gouvernementales. Parmi les entreprises privées il y a les équipementiers comme Safran ou Sodern par exemple qui se spécialisent dans la réalisation d'un équipement du véhicule spatial. Mais il y a aussi les constructeurs qui, assemblent et/ou construisent l'équipement final comme Airbus, Thales, Lockheed Martin, Boeing, OHB ou encore Northrop Grumman. Certains acteurs constructeurs sont également équipementiers comme Airbus Defense & Space, Thales Alenia Space ou Boeing. Enfin parmi les institutions nous

avons à l'international, la NASA (USA), l'ESA (Europe), le Centre National d'Étude Spatiale (CNES), Roscosmos (Russie) et la JAXA (Japon).

1.1) Focus sur la filière française

La France a réussi au cours des années à asseoir sa place de grande puissance spatiale. Elle est présente dans l'espace avec ses équipements et services développant une forte valeur ajoutée et une capacité d'innovation et d'adaptation massive. Cette industrie est fortement créatrice d'emplois qualifiés dans l'hexagone et plus encore. On compte trois gros leaders du domaine : ArianeSpace, Airbus Defense & Space et Thales Alenia Space. Autour d'eux un environnement de fournisseurs s'est développé.

La division spatiale du groupe Airbus (ADS) produit des plateformes et équipements spatiaux pour les télécommunications, l'observation de la Terre et l'exploration scientifique. Elle développe également des équipements militaires. Elle a en 2018 enregistré un chiffre d'affaires de 2 026 439 000€. ADS ne se contente pas des produits, elle propose aussi des services d'accès et de traitement de la donnée. ADS s'est élancé sur le marché des constellations avec le programme OneWeb, projet de connection haut débit via une constellation d'environ 720 satellites.

Thales Alenia Space (TAS) développe elle aussi des plateformes et équipements pour satellite de télécommunication, d'observation, de navigation militaire et scientifique. Elle a enregistré en 2017 un chiffre d'affaires de 1 973 984 000€. TAS est en cours de développement de plusieurs projets de constellations : Iridium Next, O3B ou Leo Sat par exemple. Ayant aussi pour but d'offrir une connection haut débit autour du globe. TAS se positionne aussi sur les plateformes stratosphériques avec le projet Stratobus. La plateforme stratosphérique est entre le satellite et le drone, c'est un HAPS (pour High Altitude Platform System). Il va pouvoir intégrer différentes missions comme la surveillance des frontières, la sécurité militaire ou encore la surveillance de l'environnement par exemple.

Ariane Group, appartient à Airbus et Safran, elle développe des lanceurs spatiaux. En 2018 elle génère 2 404 590 000€ de chiffre d'affaires. La société gère toutes les étapes du développement des lanceurs.

1.2) Les applications

Les applications satellitaires se décomposent en 4 : les télécommunications, la navigation, l'observation et l'exploration.

La navigation n'est aujourd'hui pas fortement impactée par les évolutions de la demande tout autant que l'exploration. En effet les satellites de navigation se rendent de plus en plus performant en terme d'indication GPS. L'exploration spatiale, existe pour innover, pour développer de nouvelles applications et faire avancer la découverte de l'espace.

Les satellites d'observation peuvent répondre à plusieurs besoins : une observation météorologique, une surveillance à grande échelle ou plus localisée permet d'offrir une réponse aux différents besoins par le biais de différents orbites. L'observation est bien moins impactée par les évolutions de la demande. La fourniture de données et de solutions, elle, subit une mutation importante avec l'arrivée de nouveaux entrants. L'exigence sur la qualité des données récoltées et la performance font évoluer le modèle économique et pousse la rapidité d'accès aux données à favoriser le développement de constellations.

La demande de satellites de télécommunication géostationnaires ralentit depuis près de 5 ans. Ralentissement lié à l'évolution de la demande et des besoins. On note une forte baisse du prix du Mbits/sec et une stagnation des marchés dits traditionnels comme celui du broadcast (TV). Aujourd'hui, la demande a évolué vers le très haut débit et la connectivité mobile. Avec l'évolution importante et rapide de la demande sur le secteur, le marché des constellations s'accélère avec un nombre de projets en croissance. Toutes ces applications satellitaires répondent à plusieurs marchés : commerciaux, institutionnels et militaires. L'ensemble de ces marchés représentent une demande distincte à laquelle les différentes applications répondent.

En plus des marchés satellitaires, on compte un marché essentiel dans le secteur : celui des lanceurs. Il s'agit d'un des secteurs les plus impactés par les évolutions. Ces évolutions sont majoritairement poussées par les nouveaux entrants plus que par la demande. Space X, Blue Origin, Virgin Galactic par exemple, représentent le New Space et bouleversent complètement le marché des lanceurs. En engendrant une baisse des coûts de lancement, en développant la possibilité de réutiliser des navettes et d'optimiser des lancement. Le marché est en grande transition. Les piliers tels qu'Ariane Space, United Launch Alliance ou les lanceurs Russes (Soyouz, Angara) représentent la majorité du marché des lancements spatiaux.

1.3) L'enjeu majeur du secteur : le « New Space »

Le new Space décrit le bouleversement induit dans le secteur qui redimensionne l'entièreté de l'industrie. Le Old Space définissait les méthodes traditionnelles établies dans l'industrie du spatial. Les principaux acteurs du Old Space sont les U.S.A et la Russie. Jusqu'alors l'industrie se résumait à la mise en place d'outils de lancements spatiaux ou de satellites majoritairement géostationnaires.

Le New Space représente l'arrivée de nouveaux entrepreneurs privés qui vont réorganiser le secteur jusqu'alors dominé par des entités gouvernementales. Le New Space a été érigé par les GAFAM qui ont pour objectif de réinventer le secteur. Ces derniers ont pour but de développer des lanceurs réutilisables, du tourisme spatial, une connectivité sans faille partout autour du monde, une visions de n'importe quel coin de la Terre en haute résolution ou encore de développer l'exploitation par minage des astéroïdes. La transition numérique joue un rôle essentiel dans le développement du New Space. Google qui s'est allié à SpaceX ou encore Blue Origin sont des acteurs du numérique qui se sont lancés dans la conquête spatiale et dans la création de nouveaux services. Ces acteurs sont arrivés sur le marché avec

un concept dont ils sont les précurseurs, ce qui a fait bondir le secteur. Aujourd'hui le New Space ne se résume pas aux entrepreneurs américains, mais de nombreux projets de constellations sont en développement (observation de la Terre ou connectivité).

Le New Space représente aussi l'arrivée d'autres nations dans la conquête spatiale. Bien que les U.S.A et la Russie soient dominants, l'Europe a aussi pu s'imposer au rang d'acteur mondial mais on compte de plus en plus l'arrivée de pays émergents dans l'horizon spatial. L'Inde ou encore la Chine montent en puissance dans leur développement spatial.

2. Applications technique de la blockchain dans l'industrie spatiale

Parmi nos sources nous avons aussi pu extraire de potentielles applications de la blockchain au secteur. La course vers l'orbite LEO peut développer de nouvelles opportunités : nouveaux business models, nouvelles collaborations, nouveaux moyens de développer la charge utile ou encore nouveaux moyens de gérer la chaîne logistique.

La blockchain s'inscrit dans le phénomène New Space. En effet quelques start-up du secteur lancent des solutions avec la blockchain. Elle est vue comme une solution permettant de générer de la transparence, de la confiance ainsi que de l'efficacité.

En terme de gestion, la blockchain peut être utilisée pour opérer le lancement et la mise en service du satellite. Cette technologie peut permettre l'accès à une information transparente et sûre qui peut bénéficier à de nombreuses industries, particulièrement l'assurance. La blockchain peut aussi être utilisée dans la transmission d'informations par satellite et permettre aux satellites de devenir des outils indépendants et efficaces. Les satellites représentent aussi une importante source de données dont l'origine et l'intégrité peuvent être vérifiées et ainsi faciliter les smart contract et la logistique de l'industrie de l'assurance. Les applications à cette industrie ne sont que des exemples pour montrer le potentiel de l'intégration de la blockchain aux applications spatiales.

En outre, intégrer la blockchain aux satellites et plus particulièrement aux constellations de satellites pourrait permettre de réduire l'investissement pour le segment sol. La blockchain permettrait de limiter la dépendance au sol concernant les mouvements, le stockage et le calcul des données ce qui permettrait de limiter la vulnérabilité des données. D'après le CTO de l'entreprise LeoStella, intégrer la blockchain aux satellites pourrait dans un premier temps permettre une distribution globale du réseau mais elle permettrait aussi de gérer l'informatique de bord.

La blockchain pourrait aussi avoir une utilité lors de missions d'exploration, essentiellement l'exploration lunaire et martienne, pour lesquelles les temps de transmission de la lune ou mars vers la Terre sont bien plus importants que sur

l'orbite terrestre. La blockchain pourrait être un moyen de gérer de manière distribuée et sécurisée les données extraites d'une mission.

De nombreuses entreprises ont fait le choix de se focaliser sur la blockchain comme nouvelle réponse technique à l'industrie. Cloud constellation est en train de développer un système permettant de limiter la dépendance aux data center par la blockchain. Space Chain, une start-up créée à Singapour a conçu un réseau de blockchain permettant de faciliter et de sécuriser les contrats avec l'utilisation des smart contract par voie satellitaire. Blockstream Satellite qui représente le premier service satellitaire gratuit mondial offrant la possibilité d'opérer et de maintenir les noeuds de Bitcoin sans faire face aux contraintes des traditionnels réseaux connectés.

Nous savons déjà qu'il existe des applications techniques à la blockchain dans le milieu spatial. Le principal frein à l'adoption de ces techniques reste la complexité de l'industrie. Dans l'industrie satellitaire, la blockchain ne peut pas s'imposer de la même manière qu'elle a pu le faire dans d'autres secteurs.

3. La gestion managériale du secteur

L'industrie du spatial est confrontée comme tout type d'industrie à des questions managériales primordiales. L'industrie doit être capable de se développer, assurer la création de valeur et rayonner parmi ses concurrents tout en assurant la confidentialité de ses données ainsi que la maîtrise de son savoir et son savoir-faire. Chacune des étapes du secteur et des outils utilisés relèvent de maillage précis donnant accès à un certain type d'information pour un certain type de destinataire.

3.1) Les ressources humaines

Dans l'industrie spatiale, les ressources humaines évoluent en fonction de la demande. L'accroissement des commandes engendre une montée en cadence de l'ensemble de la filière et induit la nécessité de recruter du personnel qualifié pour les missions à réaliser.

La relation entre les grands comptes et leurs sous-traitants est limitée en terme de ressources humaines. C'est-à-dire que le contrat traitera de ce que sera le projet, comment vont-ils y parvenir mais peu de qui se verra attribuer les missions. Contractuellement, les échanges restent techniques et formels. La main d'oeuvre n'est donc pas qualifiée et fixée en tant que telle au cours de la signature du contrat, chaque partenaire est libre de faire travailler qui il souhaite.

Le savoir et le savoir-faire des collaborateurs est une denrée précieuse pour les entreprises, c'est pourquoi les échanges restent informels.

D'après le rapport du GIFAS (groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales) publié en 2012, la plupart des secteurs nécessitant une main d'oeuvre technique ou scientifique qualifiée souffraient d'un manque d'attractivité de leurs filières diplômantes. C'est le cas par exemple des cursus

d'ingénieurs. Dans ce contexte, il est à noter que l'industrie spatiale était l'une des industries les moins touchée par ce désenchantement.

3.2) La gestion de la chaîne logistique

La logistique a avant tout pour but d'assurer et ce à moindre coût, une certaine fiabilité, qualité et flexibilité d'un circuit pour en contenter toutes les parties prenantes. La gestion de la chaîne logistique a évolué jusqu'à atteindre une logique globale favorisant les échanges entre entreprises et débutant dès la conception du produit. La concurrence, la recherche de flexibilité ainsi que de maîtrise des coûts poussent les entreprises à se concentrer sur leur cœur de métier et à externaliser le reste de leur production. Aujourd'hui dans toute industrie ainsi que dans celle du spatial, la logistique est devenue une activité clé des entreprises. C'est un support à la stratégie de l'entreprise et un levier vers de nouvelles stratégies. La gestion de la logistique dans une organisation mène souvent vers une externalisation et une délocalisation du savoir vers un partenaire.

Les entreprises sous-traitantes, ont l'avantage de récupérer la connaissance et le savoir-faire. Le sous-traitant va devenir une ressource clé de l'entreprise car ce dernier peut accumuler le savoir et savoir-faire mais aussi la connaissance du marché, des clients et concurrents. Dans l'industrie du spatial, la relation entre donneur d'ordre et sous-traitant est essentielle. Le sous-traitant peut être amené à travailler avec des clients et/ou concurrents ce qui lui octroie une connaissance certaine du marché, de la demande et de la concurrence. Ce dernier possède aussi une place essentielle de part sa maîtrise de la production (savoir-faire et outils). Les grandes entreprises du domaine spatial ont petit à petit externalisé leur savoir-faire dans une démarche de compétitivité. Chez un constructeur de solutions satellitaires, la plupart des équipements sont confiés à de plus petites structures ou d'autres entreprises spécialisées dans les équipements satellitaires (systèmes, antennes, plateformes...).

Un autre point essentiel de la chaîne logistique est aussi la traçabilité, dans le sens où pour une entreprise de l'industrie, il est nécessaire de suivre ses activités et principalement celles de la chaîne. Il faut dans un premier temps justifier de la qualité de la valeur créée de la chaîne logistique mais aussi de sa capacité dans les gestions des tâches externalisées. L'arbitrage peut permettre de faire des choix d'arbitrage entre les différents points essentiels d'une chaîne logistique comme la fiabilité, la qualité ou le respect des délais. La traçabilité va donc permettre de prévoir la gestion des flux logistiques ainsi que le maintien des relations entre les parties prenantes. Dans l'industrie, la traçabilité va permettre de localiser les flux de produits, de reconstruire l'antécédent d'un flux sur son cheminement mais aussi sur les différentes interventions.

4) Modèle conceptuel

A la suite de notre étude documentaire sur le sujet, l'ensemble de nos retours font converger notre réflexion vers une application spécifique de la blockchain qui est l'IoT également appelé l'Internet des objets. Elle consisterait à intégrer cette technologie à la communication entre objets et donc à l'appliquer dans un système spatial de façon sécurisée et affranchie. Mais aussi dans le mode de gestion de l'industrie et essentiellement dans la gestion des chaînes logistiques complexes où il est essentiel de pouvoir tracer de façon immuable les données de chaque entité pistée.

L'IoT est une innovation disruptive de l'industrie spatiale qui pousse à réinventer principalement la chaîne logistique et de conception. Comme abordé précédemment, des enjeux stratégiques reposent sur celles-ci au sein de l'industrie du spatial. La blockchain pourrait alors être une architecture pertinente de ces réseaux machine/machine et homme/machine. Cette dernière permet à des objets connectés de communiquer et de prendre des décisions via des smart contracts en toute transparence pour les opérateurs. Le tout comprenant un droit de regard et de modification pour les agents sur des données sécurisées, immuables et aisément accessibles.

Comme présenté dans la partie 3.1, la question des implications de la blockchain sur les ressources humaines dans l'industrie spatiale, ne dispose pas d'une documentation suffisante pour que nous puissions y apporter une analyse constructive.

Nous montrerons maintenant comment l'Internet des objets pourrait être le premier vecteur de pénétration de la blockchain en tant qu'outil technologique, au sein de l'industrie spatiale.

1. Technologie intégrée au produit

La technologie blockchain a de nombreuses applications aux systèmes satellitaires comme cité dans la partie 3.1.3. Ces applications au-delà d'apporter une plus-value technique aux différents dispositifs peuvent apporter des avantages d'un point de vue managérial.

Dans un premier temps intégrer la blockchain à un système satellitaire pourrait contribuer à la réduction du budget global du programme. En effet dans le cas du ralliement au sol, le nombre d'antennes Gateway pourrait être réduit. Concernant une constellation de satellite par exemple, le nombre d'antennes au sol pourrait être fortement réduit en intégrant un système de blockchain. Prenons l'exemple ultime d'une constellation liée à une unique antenne au sol. Avec la blockchain le renvoi des données de la constellation ne nécessiterait pas beaucoup de relais au sol. Avec ce système de communication entre chacun des satellites, le signal pourrait être renvoyé vers l'antenne à partir du satellite le plus proche. Ceci permettrait de ne disposer que d'une seule antenne de réception au sol. Dans ce cas extrême on peut remettre en question la sécurité de la donnée en ne reliant qu'un point au sol, en imaginant un cas de panne, de brouillage volontaire ou autre action volontaire ou non coupant la communication avec la constellation. Cette vision utopique de la solution

montre des failles, la blockchain permettrait de réduire le nombre de relai au sol de façon significative sans développer d'obstacle à la communication.

La blockchain permet aussi de stocker un certain nombre d'information qui peut accroître la capacité de stockage du satellite.

On peut aussi se poser la question de l'utilisation de la blockchain comme solution de sécurisation de l'information. Le point majeur de la blockchain est sa dimension immuable et très complexe qui rend son accès difficile. Nombreuses applications sont à étudier plus en profondeur pour permettre d'évaluer la faisabilité et l'intérêt de développer la blockchain comme un moyen de sécuriser la donnée. Cette technologie peut déjà être vue comme proscrite dans certains usages où les données doivent être modifiées et améliorées par exemple la réservation de ressource satellite. La dimension inchangeante de la blockchain ne répond pas à cet usage tandis qu'une solution de stockage plus basique est suffisante. Il faut garder en mémoire que dans cette industrie, il peut y avoir des situations et usages dans lesquels il est nécessaire de pouvoir modifier les données. Cependant, notons qu'il est aussi essentiel de garder des traces des modifications. Et la blockchain peut répondre à cette demande. Les données d'un blocs sont immuable mais dans le cas d'une blockchain privée qui suit une évolution l'information peut être modifiée via l'ajout d'un nouveau bloc à la chaîne. Ce qui permet aussi de garder traces des modifications faites.

La blockchain pourrait aussi permettre d'accroître l'indépendance des satellites. Une technologie par chaîne de bloc pourrait limiter les besoins de contact avec le sol et permettre une meilleure gestion de la donnée. Ce système pourrait aussi permettre l'accroissement de l'exploration spatiale. En effet aujourd'hui la blockchain n'est pas seulement l'affaire des start-up mais est aussi dans le viseur des agences gouvernementales. Par exemple l'ESA et la NASA étudient les pistes pour intégrer la blockchain aux explorations spatiales. Cette dernière pourrait offrir une grande autonomie des engins spatiaux, principalement pour se repérer dans l'espace dit profond afin de dynamiser et de révolutionner l'exploration spatiale. Peu d'informations circulent sur ces recherches cependant, il s'agit là d'un point essentiel à creuser afin de pouvoir identifier l'avenir de la blockchain dans cette industrie. Par exemple la NASA a débloqué en 2017 \$330 000 pour booster la recherche sur le développement d'un vaisseau complètement autonome utilisant la blockchain. L'application de cette technologie dépend des usages et de l'intérêt, ainsi que de la valeur ajoutée réelle de cette technologie intégrée dans un système spatial qui est encore à prouver. Cependant bien que les informations soient limitées pour certains usages, il n'est pas pour autant question de les mettre à l'écart du champ d'action de la blockchain dans l'industrie.

2. Technologie intégrée au mode de gestion de l'industrie : l'usine 4.0

Sujet de nombreuses particularités, l'industrie du spatial voit se confondre ses chaînes logistiques et de conception/production. En effet, la majeure partie de leurs approvisionnements qui conditionnent un outil logistique sur lequel nous allons nous attarder une nouvelle fois, nourrissent les projets en cours et futurs. Il en résulte qu'aucune routine ne peut s'installer dans une chaîne qui doit faire face à de nouveaux défis au rythme des perpétuelles innovations technologiques. La traçabilité

des opérations et des objets est donc un enjeu sensible qui peut passer par des tests à chaque étape du parcours et du tracking le reste du temps. Une chaîne multipartenaire aussi complexe, cadrée et gourmande en données exige aujourd'hui un travail de documentation, de contractualisation et d'audit chronophage et parfois non numérisé. Les incidences sur les coûts de fonctionnement de la chaîne n'ont pas été chiffrées mais de nombreux experts du secteur croient ici au potentiel de la blockchain et ce pour plusieurs raisons.

Les enjeux de gouvernance de la chaîne de production se résument le plus souvent dans l'industrie spatiale à un grand groupe qui externalise certaines activités et s'approvisionne chez des acteurs spécialisés de tailles bien plus modestes. A l'aide d'une blockchain privée, il sera à la portée de l'entreprise porteuse du projet de configurer les accès de ses partenaires en fonction de leurs implications dans la chaîne afin de conserver la confidentialité exigée. Le tout en conservant une auditabilité totale des données renseignées par les petits pour le grand groupe.

Les smart contracts pourraient quant à eux régir de façon sécurisée et automatiques les interactions entre les parties-prenantes afin de réduire la lourde gestion administrative associée.

Aujourd'hui chaque partie prenante, chaque maillon de la chaîne, dispose de sa propre base de données pour tracer les marchandises et les opérations. Il se charge de mettre-à-jour ses fichiers en fonction des retours de ses partenaires dont il est informé. Une blockchain apporte ici une solution de tracking automatiquement distribué aux opérateurs de la chaîne sous forme d'une seule et même base de données partagée, alimentée et accessible par tous. A ce sujet, il existe une blockchain privée pensée pour tracker les diamants de grande valeur, appelée Everledger. Elle recense les caractéristiques de chaque diamant afin de les authentifier, leur localisation et les transactions qui les concernent de façon immuable. Dans le secteur spatial, on pourrait y envisager des certifications automatisées des produits et processus grâce aux smart contracts et des solutions de tracking intelligents et à bas coûts grâce à des capteurs reliés entre eux et à internet via seulement quelques points précis afin de réduire les coûts de déploiement et les besoins énergétiques du réseau.

Avant toute action, un opérateur de la chaîne logistique doit avoir en sa possession le détail des opérations réalisées en amont, le verdict des différents tests et audits etc. Si une solution de blockchain permet de rendre l'information instantanément accessible à tous, elle pourrait mener à une accélération de la chaîne de production. Ainsi, les nombreux rapports rédigés à l'issue de chaque étape du processus par les opérateurs, seraient enregistrés puis distribués à toutes les autres parties automatiquement.

Il est évident qu'une transparence totale n'est pas souhaitable puisque les savoir-faire doivent être protégés, les enjeux financiers sont importants et des sujets de défense nationale sont abordés au fil de la chaîne de conception. Les enjeux de confidentialité et de sécurité sont donc centraux. Ici encore, la blockchain dispose d'une valeur ajoutée non négligeable grâce à sa résistance contre les attaques et à ses différents niveaux d'autorisations parmi les parties-prenantes.

Afin de finaliser cette étude, il est important de garder en tête qu'aujourd'hui il est prétentieux d'affirmer que la blockchain est une nouvelle technologie qui devrait

apporter une véritable plus-value à l'industrie. Au cours de nos recherches, nous avons collecté des témoignages de professionnels du spatial ayant déjà exploré la question sans avoir identifié de véritables avantages de la blockchain sur les solutions existantes. En conséquence, d'après un membre de l'équipe commerciale dédiée à la blockchain chez un grand groupe informatique américain, aucune blockchain privée n'a encore été mise en place et utilisée par une entreprise dans son système d'information interne. Mais il est aussi essentiel de ne pas la bannir de l'horizon, l'ensemble des applications de cette technologie pouvant apporter de nombreux avantages et de nouveaux usages dans l'industrie. Le débat demeure encore indécis quant à déterminer si la blockchain sera une innovation transformative, qui s'installera au cours des prochaines décennies ou disruptive, c'est-à-dire que ses applications feront office de game changer pour les pionniers et mènera à une course à l'adoption de la part des suiveurs. Nous pensons en revanche que son vecteur de pénétration dans le secteur spatial sera l'IoT, de part ses capacités de mise en commun des données sans compromettre leur sécurité. L'expérimentation est donc indispensable pour cette jeune mais prometteuse technologie.

5) Conclusion

1. Implications managériales

Notre étude a permis d'explorer un sujet dont la documentation académique reste maigre. Ce mémoire cherche à mettre en lumière les différentes applications et usages de la blockchain dans l'industrie spatiale. Parmi ces usages nous avons cherché à mettre en avant les potentiels avantages d'un point de vue managérial et stratégique, au vu d'apporter une valeur ajoutée aux entreprises du domaine.

En tenant compte des retours des professionnels du secteur ou de la technologie, la blockchain a des diverses applications dans l'industrie cependant, il est actuellement impossible pour eux de tirer une véritable plus-value à l'intégration de cette technologie. Selon eux, il est trop tôt pour que cette technologie ne révolutionne l'industrie. Parmi les ressources documentaires que nous avons parcouru, la blockchain est un outil révolutionnaire permettant de répondre aux besoins des industries et générer une certaine plus-value bien plus intéressante que les solutions déjà existantes.

Aujourd'hui la blockchain est capable de répondre aux besoins de l'industrie spatiale. Elle pourrait aussi à l'avenir répondre à d'autres besoins de cette industrie, ce qui lui permettrait de faire une entrée dans le secteur. Cependant les technologies utilisées actuellement répondent tout à fait aux besoins du secteur et la blockchain n'a, aujourd'hui, pas encore apporté de valeur ajoutée. Il est nécessaire de conclure cette étude par la potentielle évolution de cette technologie.

Au retour de notre étude, il apparaît qu'il est tout de même essentiel pour les entreprises de prendre en compte le développement de cette technologie afin à la fois de réfléchir à la fois aux différentes applications qui n'ont pas encore été mise en lumière mais aussi pour s'assurer un rebond si cette technologie devient disruptive

dans le secteur spatial. Il est nécessaire qu'en interne des entreprises, la blockchain soit étudiée, testée voire développée, il devient essentiel pour les entreprises de prendre en compte le caractère potentiellement disruptif de la blockchain, afin qu'à terme, si la blockchain se développe dans le secteur, les entreprises puissent suivre suffisamment rapidement pour être précurseurs et non suiveurs.

2. Limite de cette étude

Nous avons, au fur et à mesure de notre recherche, été motivé par la réalisation d'une étude qui pourrait alimenter la documentation déjà existante sur ce sujet.

La principale limite rencontrée lors de cette étude a été le manque de documentation et d'information. Au fur et à mesure de la précision d'information et d'orientation que nous avons fait émerger, nos moyens se sont réduits. La blockchain bénéficie de nombreuses études sur ses applications et usages. Cependant lorsqu'il s'agit de documentation alliant blockchain et industrie spatiale, il nous est difficile d'extraire de l'information. C'est pour cela qu'en plus de nos documentation diverses sur la blockchain et l'industrie spatiale, nous avons aussi fait appel à des professionnels de la technologie ou de l'industrie afin d'avoir un retour plus complet et nous permettre de faire évoluer notre étude. Aborder un sujet bénéficiant de peu de travaux publiés fut une expérience grisante même si parfois nous nous trouvâmes face à un mur du fait de l'impossibilité de croiser les sources.

De ne pouvoir être guidés par des faits scientifiquement prouvés, et particulièrement lorsque qu'il s'agissait de comprendre le lien entre la blockchain et l'industrie spatiale, nous a amené à nous rapprocher de professionnels du secteur. Ils nous aura été indiqués qu'aucun héritage d'une solution de blockchain ne pourrait alimenter notre réflexion.

Pour finir, mener une étude sur une solution technique loin de nos domaines de compétences nous a motivé à ne pas aborder les mécanismes de son fonctionnement dans le détail. Nous avons fait le choix de fournir un effort de vulgarisation du concept de blockchain sans nous appesantir sur les implications mathématiques et informatiques. Et ce bien que nous soyons absolument conscients qu'une blockchain n'existe par nature que via des algorithmes.

Cette technologie continue à interroger mais ne suscite pas d'évolution à l'heure actuelle. L'industrie du domaine spatial est une industrie très traditionnelle où les changements sont invoqués par de nouveaux acteurs qui bouleversent le marché. Notre étude a donc permis de développer des pistes exploratoires à cette technologie intégrée à l'industrie du spatial.

6) Bibliographie

Côme Berbain, *La blockchain : concept, technologies, acteurs et usages*, LES ENJEUX ÉCONOMIQUES DE LA BLOCKCHAIN, Annales des Mines - Réalités industrielles, août 2017

Patrick Waelbroeck, *Les enjeux économiques de la blockchain*, LES ENJEUX ÉCONOMIQUES DE LA BLOCKCHAIN, Annales des Mines - Réalités industrielles, Août 2017

Ilarion Pavel, *La blockchain – Les défis de son implémentation*, LES ENJEUX ÉCONOMIQUES DE LA BLOCKCHAIN, Annales des Mines - Réalités industrielles, Août 2017

Juho Lindman, Virpi Kristiina Tuunainen, Matti Rossi, *Opportunities and Risks of Blockchain Technologies – A Research Agenda*, Avril 2017

Samuel Fosso Wamba & Cameron Guthrie, *L'impact de l'adoption de la blockchain sur la performance d'entreprise : le rôle médiateur de l'innovation organisationnelle*, LOGISTIQUE & MANAGEMENT, Volume 27, Octobre 2019

O. Vashchuk, R. Shuwar, *Pros and Cons of consensus algorithm proof of stake. Difference in the network safety in proof of work and proof of stake*, ELECTRONICS AND INFORMATION TECHNOLOGIES, 2018

Konstantinos Christidis, Michael Devetsikiotis, *Blockchains and Smart Contracts for the Internet of Things*, 2016

Anne Bondiou-Clergerie, *Les chiffres clés de l'industrie spatiale française*, LES NOUVEAUX HORIZONS DE L'EUROPE SPATIALE, Annales des Mines - Réalités industrielles, Mai 2019

Jean-Jacques Tortora, *Le New Space*, LES NOUVEAUX HORIZONS DE L'EUROPE SPATIALE, Annales des Mines - Réalités industrielles, Mai 2019

Karen L. Jones, *Blockchain: Building Consensus and Trust across the Space Sector*, THE AEROSPACE CORPORATION, The Center for Space Policy and Strategy, Avril 2019

Ming Li, Li Wang, Yi Zhang, *A framework for rocket and satellite launch information management systems based on blockchain technology*, Enterprise Information Systems, Septembre 2019

Sergio Martinez-Losa del Rincon, Esteban Damian Gutierrez Mlot, *Blockchain and radio communications over suborbital spaceflights: Watchtowers and Mystics*, janvier 2020

Anne Wainscott-Sargent, *Blockchain: The Next Big Disruptor in Space*, Novembre 2019

Jeremy Straub, *CubeSat: A Low-Cost Very High-Return Space Technology*, May 2012

GIFAS, *Etude sur les besoins prospectifs en ressources humaines du secteur aéronautique et spatial*, juin 2012

Nathalie FABBE-COSTES, *Traçabilité et logistique : les interactions*, GENIE INDUSTRIEL | TRACABILITE, 10 novembre 2013