

Contribution de la technologie de la blockchain au système de la traçabilité dans la chaîne d’approvisionnement agroalimentaire des coopératives agricoles dans la région Souss Massa – Maroc.

Contribution of blockchain technology to the traceability system in the agri-food supply chain of agricultural cooperatives in the Souss Massa region – Morocco.

Auteur 1 : BOUDAD Dounia
Auteur 2 : Latifa AIT LAHCEN
Auteur 3 : Sabah JRHIRID
Auteur 4 : Maryem THIS

BOUDAD Dounia

Docteur en sciences de gestion
Faculté des Sciences Juridiques, Economiques et Sociales d’Agadir
Université Ibn Zohr – Maroc

Latifa AIT LAHCEN

Doctorante chercheuse
Faculté des Sciences Juridiques, Economiques et Sociales d’Agadir
Université Ibn Zohr – Maroc

Sabah JRHIRID

Docteur en sciences de gestion
Faculté des Sciences Juridiques, Economiques et Sociales d’Agadir
Université Ibn Zohr – Maroc

Maryem THIS

Docteur en sciences de gestion
Faculté des Sciences Juridiques, Economiques et Sociales d’Agadir
Université Ibn Zohr – Maroc

Déclaration de divulgation : L’auteur n’a pas connaissance de quelconque financement qui pourrait affecter l’objectivité de cette étude.

Conflit d’intérêts : L’auteur ne signale aucun conflit d’intérêts.

Pour citer cet article : BOUDAD .D, AIT LAHCEN .L, JRHIRID .S & THIS .M (2025) « Contribution de la technologie de la blockchain au système de la traçabilité dans la chaîne d’approvisionnement agroalimentaire des coopératives agricoles dans la région Souss Massa – Maroc », African Scientific Journal « Volume 03, Numéro 29 » pp: 0842 – 0862.



DOI : 10.5281/zenodo.15366594
Copyright © 2025 – ASJ



Résumé

La blockchain est devenue une technologie disruptive qui a la capacité de transformer l'industrie agroalimentaire, car elle promet de résoudre de nombreux problèmes liés au manque de confiance dans la traçabilité et le produit que les consommateurs achètent. Cependant, les acteurs impliqués dans la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire sont nombreux et physiquement dispersés, ce qui rend la gestion des données et des informations difficiles. En conséquence, le processus de production n'est pas transparent et la confiance est difficile à établir. Pour réussir davantage dans l'économie mondialisée d'aujourd'hui, les coopératives doivent s'efforcer d'offrir une plus grande transparence

Ce travail se concentre sur l'analyse de la perception qu'ont les entreprises du secteur alimentaire des défis et du potentiel de la technologie Blockchain dans la chaîne d'approvisionnement, une revue littéraire est réalisée dans laquelle sont présentées des études antérieures, des articles sur des sujets tels que l'origine de l'Industrie, la manière dont la chaîne d'approvisionnement est correctement gérée à l'aide de la technologie Blockchain, l'impact de la technologie Blockchain sur l'industrie alimentaire et ses avantages. Un instrument structuré est réalisé, composé de trois étapes, en commençant par des questions de catégorisation pour l'entreprise, la deuxième étape est de savoir si elle connaît ou met en œuvre les technologies , et les résultats obtenus sont analysés et interprétés. Bref une meilleure compréhension de la technologie blockchain pour les différents acteurs de la chaîne alimentaire fraîche, en particulier pour les coopératives, constitue une opportunité d'améliorer la réputation et la concurrence.

Mots clés : Blockchain, traçabilité, coopératives, contrat intelligent, , sécurité alimentaire, chaîne d'approvisionnement en aliments frais.

Abstract

Blockchain has become a disruptive technology with the potential to transform the agri-food industry, promising to solve many problems related to the lack of trust in traceability and the product consumers purchase. However, the stakeholders involved in the agri-food supply chain are numerous and physically dispersed, making data and information management difficult. As a result, the production process is not transparent, and trust is difficult to establish. To achieve greater success in today's globalized economy, cooperatives must strive to provide greater transparency.

This paper focuses on analyzing food sector companies' perceptions of the challenges and potential of blockchain technology in the supply chain. A literature review is conducted, presenting previous studies and articles on topics such as the origin of the industry, how the supply chain is properly managed using blockchain technology, and the impact of blockchain technology on the food industry and its benefits. A structured instrument is developed, consisting of three steps: first, categorization questions for the company, then the second step is to determine whether the company is familiar with or has implemented the technologies, and the results are analyzed and interpreted. In short, a better understanding of blockchain technology for the various stakeholders in the fresh food chain, particularly cooperatives, represents an opportunity to improve their reputation and competitiveness.

Keywords : Blockchain, traceability, cooperatives, smart contract, food safety, fresh food supply chain

Introduction

Avec le développement de l'économie mondiale, le niveau de vie des populations s'est amélioré. Cela a conduit à un changement dans les habitudes des consommateurs, une plus grande attention étant désormais accordée à la sécurité et à l'intégrité des aliments. Cependant, ces dernières années, une série de scandales liés à la sécurité alimentaire (Trienekens et Zuurbier, 2008) et à l'authenticité des nombreuses certifications alimentaires existantes (Boyacia et al., 2014) mettent en péril la confiance des consommateurs dans les produits qu'ils achètent (Trienekens et al., 2012).

L'agriculture et les chaînes d'approvisionnement alimentaire sont deux domaines étroitement liés, car les produits agricoles sont presque toujours utilisés comme intrants dans certaines chaînes d'approvisionnement, où le consommateur est souvent le client final.

La chaîne d'approvisionnement alimentaire implique de nombreux acteurs différents, tels que les agriculteurs, les transformateurs, les transporteurs, les centrales d'achat, les distributeurs et les supermarchés et le commerce traditionnel de détail. Ce système est actuellement inefficace et peu fiable. Par exemple, lorsque les gens achètent des produits, ils ne connaissent pas leur origine, au-delà des informations qui figurent sur l'étiquette. Plusieurs initiatives ont été identifiées dans lesquelles la technologie pourrait être utilisée pour résoudre des problèmes pratiques dans la chaîne d'approvisionnement agricole. Ces initiatives peuvent être divisées en deux catégories : l'intégrité alimentaire et le soutien aux petits agriculteurs.

L'intégrité alimentaire, comprise comme la sécurité et l'authenticité des aliments dans la chaîne d'approvisionnement, tant au niveau physique que numérique, concerne un échange fiable d'aliments tout au long de la chaîne, où chaque acteur doit fournir des détails complets sur l'origine des produits. C'est dans cette dernière couche que doivent être fournies des informations fiables sur l'origine et la provenance des produits alimentaires.

Dans la situation actuelle, une grande partie des données et des informations sur la conformité sont enregistrées sur papier ou stockées dans une base de données centralisée. Les problèmes liés à ces processus d'information physiques et numériques centralisés sont les suivants :

- Le coût élevé et l'inefficacité des processus papier.
- Fraude, corruption et erreurs dans les deux processus.
- Problèmes dus aux erreurs humaines et à la manipulation des données (intégrité des enregistrements numériques).
- Dépenses consacrées aux certifications.

Plusieurs auteurs ont suggéré que le secteur agricole pourrait être un domaine d'intérêt pour l'application de la technologie blockchain, car les consommateurs sont de plus en plus préoccupés par la sécurité alimentaire et la durabilité et exigent davantage d'informations sur la chaîne agroalimentaire. Cependant, la longueur et la complexité des chaînes agroalimentaires modernes ont créé une distance entre les consommateurs et les producteurs qui rend difficile pour les consommateurs de faire part directement de leurs préoccupations et de leurs questions aux producteurs. Ainsi, la demande accrue d'informations sur les aliments reflète le besoin d'une plus grande transparence. Dans le même temps, de plus en plus de produits alimentaires et de boissons sont accompagnés d'une variété de systèmes de certification, avec un risque croissant de fraude (par exemple, la vente de produits non qualifiés avec des labels ou des allégations de haute qualité) et de falsification.

En ce sens, la blockchain, qui offre des transactions permanentes et immuables et un accès à des données distribuées, a le potentiel de faciliter l'échange de données et de réduire les possibilités de fraude ou de falsification, offrant ainsi une plus grande transparence et une plus grande confiance des consommateurs.

Il existe de nombreux exemples d'entreprises et d'initiatives qui cherchent à améliorer l'intégrité de la chaîne d'approvisionnement alimentaire grâce à la technologie blockchain, comme Cargill Inc (Bunge, 2017), Coca-Cola (Chavez-Dreyfus, 2017), Carrefour (Love and Somerville, 2018), Walmart (Wass, 2017) ou la plateforme chinoise Jd.com (Peter, 2017).

D'autre part, le cœur des problèmes que pose l'internationalisation aux coopératives provient des difficultés et des barrières à la croissance dues à la petite taille des exploitations qui les composent (McMurtry et Reed, 2009). Selon la littérature générale, l'internationalisation est devenue une stratégie indispensable pour que les entreprises restent compétitives sur les marchés, en particulier dans les situations de crise économique (Lee et Makhija, 2009). Dans le cas des coopératives, plusieurs auteurs soutiennent que l'internationalisation représente une opportunité pour les coopératives de croître et d'atteindre la taille nécessaire pour être compétitives dans le contexte mondialisé actuel, ainsi que pour améliorer leur efficacité et leur position concurrentielle sur les marchés. Nos recherches suggèrent que les coopératives ne peuvent être efficaces et prospères dans l'économie mondialisée d'aujourd'hui que si elles s'efforcent constamment d'offrir transparence et confiance (Bretos et Marcuello, 2017).

La technologie Blockchain est probablement la plus disruptive depuis l'arrivée d'Internet et est capable de transformer les industries en décentralisant la confiance, en générant un échange de biens et de services sans avoir recours à des tiers. Cela est possible parce que les informations

circulant à travers les registres comptables partagés sont vérifiées, tout comme la vérification de celles qui se trouvent aux extrémités. Les informations présentes dans cette technologie sont saisies à travers un enregistrement inaltérable (garanti par cryptographie), qui est répliqué chez tous les participants, à travers un protocole de communication standard et qui est accessible à tous, éliminant ainsi le besoin d'accusés de réception et de rapprochements.

La technologie Blockchain peut donc apporter une contribution significative à la réalisation de l'objectif de transparence qui permettra aux coopératives d'avoir une meilleure réputation sur les marchés et d'améliorer leur position concurrentielle. Sur la base des raisons ci-dessus, l'objectif principal de cet article est de conceptualiser, concevoir et tester un système de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire basé sur la technologie blockchain qui aide les producteurs de fruits et légumes associés en coopératives à améliorer la transparence concernant l'origine et les processus incorporés dans le produit, ainsi qu'à offrir confiance aux acheteurs par rapport aux producteurs des pays émergents d'Afrique, d'Amérique et d'Asie, et à réduire les avantages comparatifs par rapport aux pays producteurs des pays développés. La technologie Blockchain peut fournir un moyen de garantir la permanence des enregistrements et potentiellement faciliter le partage de données entre divers acteurs de la chaîne de valeur agroalimentaire. Ce potentiel peut conduire à un changement de paradigme qui facilite la transparence et la confiance des consommateurs envers les petits producteurs regroupés en coopératives. À notre connaissance, il existe peu de publications appliquant la technologie blockchain à un système de traçabilité pour résoudre le problème de crédibilité de l'information dans la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire. Dans ce sens, cette étude développe un système de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire basé sur la technologie blockchain et présente les détails de sa mise en œuvre. Ce système peut accroître la transparence de la gestion de la chaîne d'approvisionnement et renforcer considérablement la confiance dans les produits agroalimentaires commercialisés. Le travail est organisé comme suit. Nous commençons par un bref aperçu de la littérature existante sur la technologie blockchain et son application dans la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire. Nous présentons ensuite le cadre conceptuel du système de traçabilité et décrivons la preuve de concept. Enfin, nous discutons des résultats et présentons des conclusions et des recommandations sur l'application de la technologie blockchain au secteur coopératif agroalimentaire.

1. Revue de littérature

À l'échelle mondiale, les circuits de production et de vente au détail des aliments évoluent. On observe une dépendance croissante vis-à-vis des chaînes d'approvisionnement mondiales et des systèmes de distribution à grande échelle, tels que les supermarchés. Les systèmes alimentaires sont également de plus en plus capitalistiques, concentrés et intégrés verticalement. Ces chaînes d'approvisionnement augmentent les obstacles à la participation des petits producteurs et transformateurs agricoles aux marchés mondiaux. Dans ce contexte, la blockchain et les contrats intelligents représentent une réelle opportunité pour une plus grande participation au marché pour les petits agriculteurs et les coopératives (Tripoli et Schmidhuber, 2018). Des exemples d'application peuvent être trouvés dans les expériences d'AgriLedger, FarmShare, OlivaCoin ou Grass Roots Farmers. Mais les chaînes d'approvisionnement agricoles présentent des inefficacités considérables, qui affectent tous les acteurs, des producteurs aux consommateurs. Les défis incluent l'amélioration de la transparence en raison de l'incohérence ou de l'indisponibilité des données, de la forte proportion de travail manuel et papier et du manque d'interopérabilité entre les agents de la chaîne. Pour restaurer la confiance des consommateurs à la suite d'alertes de sécurité alimentaire, de nombreuses mesures sont prises en matière de transparence dans la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire (Akkerman et al., 2010). Dans ce sens, le concept de traçabilité alimentaire en tant que « capacité de suivre et de suivre un aliment à toutes les étapes de la production, de la transformation et de la distribution » (Commission européenne, 2013) revêt une grande importance. Plusieurs études considèrent l'utilité d'adopter des technologies avancées dans la gestion de la traçabilité agroalimentaire, notamment avec l'utilisation d'étiquettes RFID, de codes-barres ou de codes QR et leur intégration avec d'autres technologies telles que les WSN (Wireless Sensor Networks), le GPS (Global Positioning System), le SIG (Geographic Information System) (Li, Kehoe et Drake, 2006; Li, Lin et Chen, 2010; Sari, 2010; Ustundaga et Tanyasb, 2009; Wang et al., 2010; Yang et al., 2008) ou l'IoT (Internet des objets) (Lin et al., 2017a; Zinas et al., 2017). Actuellement, la technologie blockchain a attiré l'attention du secteur agricole. La blockchain est une base de données distribuée composée de blocs liés par ordre chronologique (Morris, 2016 ; Nakamoto, 2008 ; Popper, 2016). Ils sont comme des registres (un « grand livre ») qui permettent à plusieurs parties d'accéder et de mettre à jour une seule version tout en conservant un contrôle partagé. Ainsi, dans un réseau d'affaires, comme celui des chaînes de produits frais, tout groupe d'organisations, de détaillants, de producteurs ou de consommateurs se connecte avec le désir de transférer des actifs numériques, chaque membre obtenant un

enregistrement de la transaction et un accès à la dernière version du grand livre. Ainsi, le système blockchain établit la confiance dans l'ensemble du système en utilisant un registre distribué qui contient l'état actuel des actifs et l'historique de toutes les transactions qui sont protégées par cryptographie afin qu'elles ne puissent pas être manipulées ou supprimées.

Un contrat intelligent peut être intégré à la blockchain, qui est un programme informatique qui exécute des accords établis entre deux ou plusieurs parties, provoquant la réalisation de certaines actions à la suite d'une série de conditions spécifiques remplies (Kosba et al., 2016). Ainsi, dans un contrat intelligent, les conditions sont programmées, signées par les parties impliquées et placées sur une blockchain afin qu'elles ne puissent pas être modifiées. Lorsqu'une condition programmée se produit, le contrat intelligent exécute automatiquement la clause correspondante, mais si une partie ne respecte pas les conditions, le contrat n'est pas exécuté. Bien que la technologie blockchain présente un potentiel considérable pour les applications commerciales (Gartner, 2017), les innovations dans les architectures blockchain et les modèles commerciaux associés au secteur agroalimentaire sont encore mal connues (Lin et al., 2017b ; Tripoli et Schmidhuber, 2018 ; Yan et Jia, 2017). Dans le domaine de la traçabilité et de la blockchain, nous trouvons certaines études qui cherchent à résoudre les problèmes de sécurité alimentaire (Ly et Chen, 2016) et de conformité aux systèmes HACCP (Tian, 2017), ainsi que celles qui combinent la blockchain avec les technologies RFID (Tian, 2016) ou les appareils IoT (Caro et al., 2018, Lin et al., 2018 ; Shen, Miao et Liu, 2017 ; Yan et Jia, 2017 ; Zinas et al., 2017). Enfin, dans le domaine des petits producteurs, la coopérative Jaouda, qui vend entre autre des oranges, utilise la technologie blockchain pour informer ses consommateurs de manière fiable sur les conditions de production.

2. Méthodologie de recherche

Un système de traçabilité agroalimentaire vise à enregistrer toutes les informations relatives à la chaîne d'approvisionnement depuis la culture jusqu'à la distribution des produits et à les associer à d'autres données telles que les données environnementales ou les certifications. Comme décrit ci-dessus, les caractéristiques de la technologie blockchain correspondent parfaitement aux besoins du système de traçabilité agroalimentaire. L'objectif du développement d'un système de traçabilité agricole basé sur la blockchain est d'offrir une plus grande transparence et de générer la confiance des distributeurs, des supermarchés, des consommateurs et des autorités afin d'accroître la compétitivité des coopératives. Cela implique l'implication de différents agents (Ge et Brewster, 2016). Il est pertinent de traduire l'applicabilité théorique de la blockchain en scénarios réels à travers des cas d'utilisation car de

nombreux défis existent encore, certains techniques, tels que l'évolutivité et les performances ; et d'autres qui ne sont pas si techniques, comme celles de légalité et de gouvernance, qui doivent être résolues. Le cas d'utilisation dans la chaîne d'approvisionnement des oranges d'une coopérative de la région Souss Massa (Sud du Maroc) implique des problèmes d'information supposément traités par la block Chain. Les oranges parcourent un long chemin avant d'atteindre les consommateurs. Il y a beaucoup de choses que les consommateurs (et donc les détaillants) aimeraient savoir sur les oranges. Sont-ils des aliments sûrs ? Sont-ils produits de manière durable ? Dans quel type de sol les plantes ont-elles poussé ? Quel type d'engrais a été appliqué ? Quelles étaient les conditions de travail à la ferme ? Pouvons-nous être sûrs de leur sécurité et de leur durabilité s'ils portent un certificat ? Comment pouvons-nous être sûrs que le certificat est authentique ? En ce qui concerne la block Chain, d'autres questions doivent être posées, comme par exemple : quels problèmes résout-elle ? Quels nouveaux problèmes cela crée-t-il ? Qui en profite ? Quel impact cette nouvelle technologie aura-t-elle sur les écosystèmes numériques pour la transparence et la confiance dans le secteur agroalimentaire ? Ce nouveau type de confiance et de transparence va-t-il révolutionner la manière dont sont organisées les filières agroalimentaires ? Quelles connaissances et expériences sont nécessaires pour exploiter la puissance de la blockchain ?

Pour améliorer la compréhension de la technologie et de ses implications, ces questions ne peuvent trouver de réponse que par une exploration conjointe des parties prenantes dans le cadre d'une étude pilote. Grâce à la collaboration avec les activités du spin-off Bo True, de nombreux détails étaient déjà connus sur la chaîne d'approvisionnement et le réseau des oranges, de sorte que le projet a pu se concentrer sur l'application de la technologie blockchain au processus généré par une coopérative de petits producteurs de la région.

La phase préliminaire consistait à identifier les difficultés à résoudre avant d'exploiter commercialement la blockchain, telles que :

- résoudre les problèmes de confidentialité et de sécurité dans les transactions numériques et les échanges de données ;
- choix entre différentes conceptions et implémentations de blockchain ;
- relation et interaction de la base de données centralisée existante avec la technologie de réseau décentralisée ;
- décision sur l'accessibilité des données en l'absence d'un cadre réglementaire pour la blockchain ;

- décision sur les questions liées aux performances (rapidité, fiabilité) et à l'évolutivité (capacité de la blockchain) de la technologie blockchain ;

- décision sur les coûts découlant du développement et de la maintenance du réseau blockchain.

Compte tenu de ces problèmes, le projet aborde les problèmes techniques suivants pour le cas d'utilisation spécifique :

- Quels problèmes liés au partage d'informations, à la confidentialité et à la sécurité existent dans le cas d'utilisation ?
- Quelles données doivent être enregistrées ?
- Quelle plateforme blockchain est la plus appropriée dans ce cas ?
- Quelles fonctionnalités de la plateforme choisie sont les plus pertinentes pour le cas d'utilisation ?
- Quels acteurs sont concernés par la blockchain ?
- Quelles étapes sont nécessaires pour mettre en œuvre la blockchain ?
- Quelles sont les exigences spécifiques requises pour l'infrastructure d'hébergement de données ?

Le projet adopte une approche multipartite dans le but d'acquérir une expérience complète dans le développement d'applications blockchain dans l'agroalimentaire, ainsi qu'une perspective d'expérience utilisateur.

Lors du choix de la technologie blockchain pour le projet pilote, les aspects suivants ont également été pris en compte :

- Faisabilité : Déterminée par les coûts (y compris le matériel minimum requis, les coûts de licence, les coûts de programmation, etc.) et la complexité de la technologie.
- Commodité : déterminée par la disponibilité du logiciel, l'expérience et la facilité de mise en œuvre.
- Performances : Déterminées par le nombre de participants autorisés, la rapidité et le temps de traitement.

Finalement, une ontologie a dû être utilisée et, bien que nous n'en connaissions aucune liée aux blockchains, celle proposée par Kim, Fox et Gruninger (1995) a été choisie, qui a été un élément clé de la modélisation commerciale (Fox et Gruninger, 1998) et a suscité l'intérêt des chercheurs en sciences alimentaires (Dabbene, Ga et Tortia, 2014 ; Regattieri, Gamberi et Manzini, 2007) pour assurer la sécurité alimentaire tout au long de la chaîne d'approvisionnement alimentaire. Les hypothèses clés dans le développement de cette

ontologie pour une application à un système de blockchain sont qu'il doit être possible de tracer d'une entité à une autre, et que l'unité de ressource traçable (également connue sous le nom de TRU, une représentation d'un lot de quelque chose, par exemple des fraises) doit être traçable.

Les éléments clés de la technologie qui seront traités dans le PoC sont :

Blockchain : chaque bloc contient les données de toutes les transactions sur une période donnée et peut créer une empreinte numérique qui peut être utilisée pour vérifier la validité des informations et se connecter au bloc suivant.

Hachages chaînés : les blocs sont liés entre eux dans un ordre chronologique linéaire (comme une chaîne) avec un hachage numérique ou « résumé » du bloc précédent. C'est essentiel pour la sécurité de la blockchain et pour garantir sa pérennité, car toute modification des données d'un bloc affecterait tous les autres blocs suivants.

Algorithme de consensus : pour qu'un nouvel ensemble de transactions soit écrit dans un bloc, le bloc doit être validé par un algorithme de consensus.

Un réseau peer-to-peer : un réseau de pairs ou de « nœuds » qui fournissent généralement la puissance de calcul nécessaire pour parvenir à un consensus.

Processus de travail : pour écrire dans la « blockchain », chaque nœud doit effectuer une procédure mathématique complexe appelée « minage ».

Un fichier distribué immédiatement répliqué : chaque blockchain est répliquée sur tous les « nœuds » ou ordinateurs du réseau peer-to-peer de cette blockchain. La présence ou l'absence d'un nœud particulier (par exemple, être hors ligne) n'affectera pas le fonctionnement de la blockchain dans son ensemble.

Signatures cryptographiques : Pour savoir quelle personne (à l'aide d'une identité exprimée sous forme de numéro) effectue une opération, chaque opération est signée à l'aide de clés publiques et privées. Ainsi, toutes les transactions sur une blockchain sont signées cryptographiquement pour prouver l'identité, l'authenticité et appliquer les droits d'accès en lecture/écriture.

Blockchains avec/sans autorisation : une blockchain avec autorisation possède un ensemble de propriétaires qui contrôlent les droits de lecture/écriture/minage.

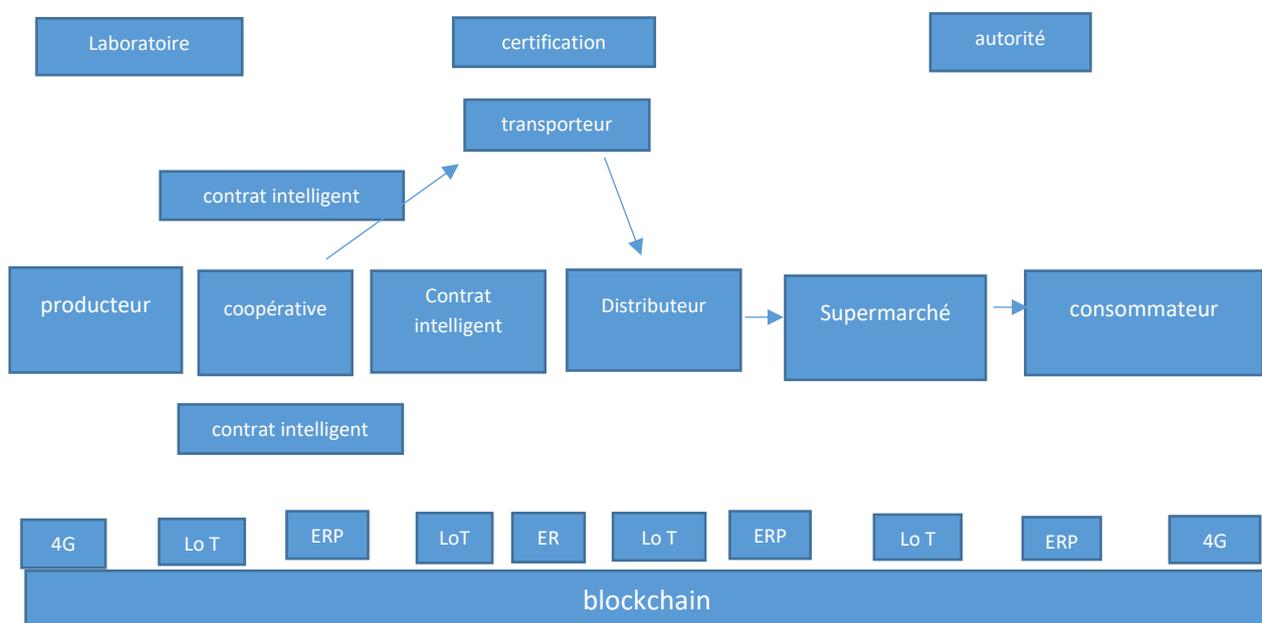
Contrats intelligents : programmes simples qui sont ajoutés à la blockchain (Buterin et al., 2014-2016).

La chaîne de valeur agroalimentaire que nous avons testée dans le cas d'utilisation comprend les phases de culture, de récolte, de transformation, de stockage et de distribution, et utilise des

codes-barres, des codes QR et la RFID pour l'acquisition, le traitement et le contrôle des données. De plus, la technologie blockchain et les contrats intelligents sont utilisés pour garantir que les informations partagées et publiées sont fiables et authentiques.

Au sein d'un système de traçabilité centralisé, les membres de la chaîne d'approvisionnement s'appuient sur un centre de surveillance de l'information pour transférer et partager leurs informations. Ce système de traçabilité centralisé met en œuvre efficacement l'échange d'informations et, dans une certaine mesure, gère la traçabilité tout au long de la chaîne, mais il s'agit d'un système d'information monopolistique, asymétrique et opaque, qui pourrait générer des problèmes de confiance, de fraude et de falsification d'informations. Comme le montre la figure 1, le système de traçabilité qui intègre la technologie blockchain et les contrats intelligents pourrait devenir une innovation qui pourrait accroître la transparence de la chaîne d'approvisionnement, renforcer la crédibilité des informations, effectuer un suivi en temps réel des produits agroalimentaires et, par conséquent, améliorer la sécurité de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire.

Figure 1. Schéma de flux et éléments de collecte et de stockage de données dans une conception de block Chain



3. Résultats et discussion

3.1. Agents et données impliqués dans le système de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire basé sur la technologie Blockchain

La preuve de concept basée sur un cas d'utilisation lié à la production des oranges dans la région Souss Massa a été développée en construisant un démonstrateur qui suit les différents nœuds

impliqués dans la chaîne d'approvisionnement des oranges. Le démonstrateur s'est basé sur une analyse préalable de la chaîne d'approvisionnement en oranges fraîches et des interactions entre les agriculteurs, la coopérative, ses certificateurs, ses prestataires logistiques, ses distributeurs et les supermarchés pour permettre d'associer une représentation numérique d'un lot de oranges à un certificat numérique.

Le cas d'utilisation peut être résumé comme suit : les fruits cultivés et récoltés dans les fermes au sein de la région Souss Massa) ont besoin d'une autorité de certification pour confirmer que c'est le cas et délivrer l'autorisation de signer un certificat de bonnes pratiques agricoles, qui permet à la ferme de certifier les emballages individuels des oranges qu'elle produit et les marchés coopératifs. Le producteur et le conseiller technique enregistrent également toutes les opérations réalisées sur l'exploitation grâce à leur smartphone. Si la ferme utilise un type de pesticide non autorisé, le laboratoire entre les données dans la blockchain ; Si le compteur numérique enregistre une consommation d'eau, il l'insère dans la chaîne. Les contenants collectés sont identifiés à l'aide d'un code-barres, d'un QR ou d'une étiquette RFID (comprenant les informations de l'exploitation, la variété, la date de plantation, l'état de fertilisation, l'utilisation de pesticides, etc.) que la coopérative peut lire et transférer vers son ERP. Les fruits transformés dans la coopérative sont placés dans des chambres en attendant l'expédition et le chargement. Pendant ce temps, des capteurs surveillent l'état du produit et de l'environnement en temps réel. Toutes les informations pertinentes sont enregistrées dans le système blockchain via le réseau 4G pour les smartphones, LPWAN pour les appareils IoT ou LAN pour les capteurs ou les données ERP. Ainsi, l'écosystème comprend des données provenant de l'ERP de la coopérative ainsi que d'autres appareils IoT installés sur le terrain qui mesurent les données environnementales, du sol et des plantes, des étiquettes et des codes 2D et des capteurs dans le centre de manutention qui surveillent l'état du produit tout au long de ses différentes phases de manutention, de conservation et d'expédition. Toutes ces informations sont vérifiées par le système blockchain sans aucune intervention humaine et sont ouvertes à tous les membres autorisés. De cette manière, toutes les parties impliquées dans cette chaîne peuvent vérifier la validité du certificat émis en consultant la blockchain : le détaillant peut consulter les données du portail blockchain et s'assurer que le contrat intelligent a été exécuté, et les consommateurs peuvent utiliser leur smartphone pour accéder aux données stockées dans la blockchain et obtenir toutes les informations sur les produits agroalimentaires et leur traçabilité (producteur, exploitation, date de récolte, coopérative, informations de transformation, date d'expédition, traitements effectués, etc.) simplement en scannant le code

2D. De plus, toutes les informations tout au long de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire sont entièrement vérifiables, ce qui signifie que les distributeurs peuvent également obtenir des informations détaillées sur les produits finis en temps réel en inspectant le système blockchain.

3.2. Alternatives de conception et de mise en œuvre pour la Blockchain

Il existe actuellement un grand nombre de technologies logicielles blockchain qui reflètent différentes décisions de conception en termes d'architecture technique. Outre Bitcoin, les technologies blockchain les plus populaires disponibles à l'heure actuelle sont Ethereum (Gerring, 2016), Hyperledger, qui a reçu un large soutien et est utilisé dans de nombreux projets différents, y compris son utilisation par Walmart dans la chaîne d'approvisionnement du porc (del Castillo, 2016 ; Higgins, 2017), et BigChainDB (McConaghy, 2017).

Les principaux choix techniques sont les suivants :

1. Conception des autorisations : Bitcoin et Ethereum supposent des registres ouverts et sans autorisation, tandis que Hyperledger propose plusieurs blockchains, chacune pour un secteur différent.
2. Algorithme de consensus : Bitcoin et Ethereum utilisent un algorithme de consensus de « preuve de travail », tandis que Hyperledger et BigChainDB utilisent des méthodes de vote plus simples.
3. Contrats intelligents : Ethereum et Hyperledger ont tous deux mis l'accent sur la capacité d'exécuter des contrats intelligents sur leur pile technologique.

Parce que Hyperledger permet des configurations de blockchain pour des secteurs d'activité spécifiques, comme l'agroalimentaire, ainsi que la possibilité de programmer des chaincodes pour permettre l'accès à certains types de données au smart contract par différents participants, nous avons décidé d'utiliser cette technologie pour la preuve de concept.

3.3. Évolutivité et confidentialité des applications Blockchain

Le Proof of Concept a été soumis à des tests d'évolutivité pour déterminer, en pratique, les performances réelles, ce qui n'est pas un aspect critique si les points de contrôle de traçabilité sont correctement dimensionnés. Avec Hyperledger, les données générées par la preuve de concept étaient incluses dans un contrat intelligent et étaient disponibles ou « visibles » uniquement pour les participants au contrat intelligent. Cela garantit que la confidentialité est préservée. Pour ce faire, l'accès aux données devait être inscrit dans le contrat intelligent dès le début.

3.4. Degré d'acceptation par les parties prenantes

La nature distribuée de la blockchain signifie que sa mise en œuvre implique inévitablement plusieurs parties. Les principales parties prenantes du cas d'utilisation étaient les producteurs partenaires, la coopérative de manutention, leurs sociétés de logistique, leurs plateformes d'achat, leurs détaillants, l'organisme de certification, leurs prestataires de services tels que les laboratoires et les compagnies d'assurance, et l'autorité de sécurité alimentaire.

Lors de la mise en œuvre d'une solution blockchain pour ces parties prenantes, les coûts et les avantages de la blockchain ont été évalués. Cependant, l'adoption de la blockchain peut changer l'écosystème en introduisant de nouveaux acteurs et en changeant leur position au sein de l'écosystème. Un niveau considérable de scepticisme a été détecté parmi les parties prenantes, en raison de la manière dont la Blockchain est présentée comme une panacée à tous les problèmes d'information, des problèmes techniques qui restent à résoudre (Iansiti et Lakhani, 2017) et parce qu'ils ne connaissent pas d'histoires de réussite proches de la réalité.

Les principales préoccupations de nos parties prenantes étaient les suivantes :

- La fiabilité des données placées sur la blockchain ;
- Comment gérer les différentes technologies blockchain ;
- La validité et la cohérence des contrats intelligents ;
- L'efficacité de la blockchain dans la prévention réelle de la fraude dans la chaîne alimentaire.

La plupart de ces préoccupations peuvent être résolues ou atténuées grâce aux avancées technologiques (par exemple, l'utilisation de données générées par des capteurs et des machines) ou institutionnelles (par exemple, le développement de normes pour les contrats intelligents). Bien que l'utilisation de la blockchain devrait décourager la manipulation des données, elle ne pourra pas empêcher les gens de saisir des informations fausses ou erronées ou de cacher des informations sur la blockchain, bien que l'utilisation de capteurs et d'appareils IoT minimisera ces problèmes.

La blockchain à elle seule ne peut pas non plus éliminer la fraude dans la chaîne alimentaire. Cependant, lorsque davantage de données disponibles seront liées à la blockchain, il sera plus facile de la détecter, en raison de la possibilité d'utiliser des contrôles croisés et de l'immutabilité des enregistrements.

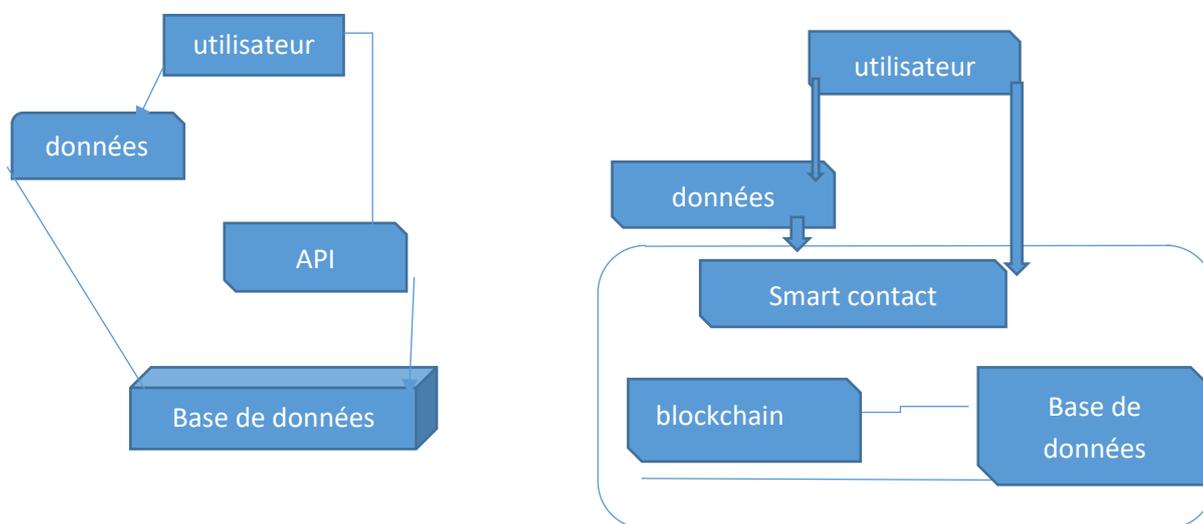
3.5. Architecture

Le prototype a été construit à l'aide de Hyperledger Fabric (v0.6) qui permet aux parties impliquées de mettre à jour et d'interroger les données sur la blockchain en fonction de leur rôle et de leurs droits d'accès.

Dans Hyperledger Fabric, un membre peut être de différents types : utilisateurs, pairs et validateurs. Les utilisateurs peuvent être divisés en ceux qui ont besoin d'envoyer des données à la plateforme, tels que les producteurs, les coopératives et les transporteurs, qui doivent s'inscrire ; et les utilisateurs finaux, comme le supermarché ou le consommateur, qui peuvent consulter et obtenir les résultats. Ce type d'utilisateur n'a normalement pas besoin de s'inscrire. Les pairs sont des nœuds qui conservent une copie du grand livre. Les validateurs conservent également une copie, mais valident les transactions entrantes et peuvent participer à l'algorithme de consensus de la blockchain. Pour éviter que tous les nœuds aient un accès identique à toutes les données, un contrat intelligent a été conçu pour fournir aux participants au contrat un accès à différentes données au sein de cette base de données. Toutes les requêtes de données ont été prédéfinies dans des fonctions écrites dans le code du contrat intelligent.

L'architecture de base du système Blockchain, comparée au système centralisé, a été conçue comme le montre la figure 2.

Figure 2. Architecture du démonstrateur (architecture centralisée vs Blockchain)



Un avantage important de cette architecture est qu'elle permet un lancement facile du démonstrateur et peut donc être déployée et mise à l'échelle sans trop d'effort. Enfin, pour faciliter l'interaction de l'utilisateur final avec la blockchain, une API et une application front-end accessibles depuis un PC ou un appareil mobile peuvent être développées.

4. Conclusion

La technologie Blockchain offre de nombreux avantages, car elle peut fournir un moyen sécurisé et distribué pour effectuer des transactions entre différentes parties. Il s'agit d'un élément clé de l'agriculture et de la chaîne d'approvisionnement alimentaire, où de nombreux acteurs sont impliqués (Lin et al., 2017b).

La nouveauté de cet article réside dans le fait que toutes les données et transactions effectuées sur la chaîne sont enregistrées sur la blockchain, gérées via des contrats intelligents. La preuve de concept démontre que ce système est plus efficace, plus sûr, plus transparent et évite les intermédiaires, ce qui entraîne des coûts moindres pour les membres des coopératives, tout en générant une plus grande confiance chez les distributeurs, les supermarchés et les consommateurs, ce qui est particulièrement bénéfique pour les petits agriculteurs et les coopératives. Pour certifier l'origine et la traçabilité de la production des oranges à l'aide de la blockchain, une preuve de concept a été développée dans une coopérative Jaouda en utilisant une couche Hyperledger pour créer une blockchain autorisée et personnaliser les rôles de chaque acteur du réseau. L'expérience de conseil avec les oranges a permis la programmation appropriée des contrats intelligents blockchain. Pour l'instant, peu de personnes remettent en question la pertinence de la blockchain dans l'agroalimentaire. La question principale porte plutôt sur la valeur ajoutée de la blockchain par rapport aux solutions TIC (Technologies de l'Information et de la Communication) existantes. Cette preuve de concept (PoC) a démontré qu'il est possible de placer les informations de base des journaux agricoles et les données de manutention, d'emballage et d'expédition sur une blockchain avec un registre autorisé et un contrat intelligent. Comparé aux scénarios traditionnels avec des bases de données centralisées, le démonstrateur PoC montre comment la blockchain peut être utilisée pour garantir que différentes parties partagent la même couche d'informations sur la validité et la provenance des certificats inviolables. Nous montrons, grâce à la conception architecturale, qu'un tel système peut fournir des données pertinentes aux participants, peut maintenir la confidentialité et peut propager efficacement les données entre les participants à l'aide de la technologie blockchain. Par conséquent, la preuve de concept a démontré que la technologie blockchain pouvait être utilisée avec succès dans un tel contexte. De plus, compte tenu des expérimentations réalisées, il a été démontré qu'un serveur de taille moyenne (par exemple, dans le cloud) pouvait fonctionner de manière adéquate comme un nœud pour les besoins de ce type de cas d'utilisation. Il n'y avait pas non plus besoin de matériel spécial et toute l'infrastructure logicielle (dans ce cas Hyperledger Fabric) est open source et gratuite. Au cours du

développement du PoC, il a été appris qu'il est important de maintenir des dialogues réguliers entre les parties prenantes pour mieux comprendre les intérêts de chacun et identifier un terrain d'entente pour la mise en œuvre de la blockchain. L'expérience de ce projet montre que les réunions, où différents cas d'utilisation sont discutés, sont un bon mécanisme pour développer l'écosystème blockchain dans le secteur agroalimentaire. Comme l'ont clairement montré les discussions et les consultations avec les parties prenantes, la blockchain créera différentes opportunités et défis pour différentes parties prenantes ou organisations, en fonction de leur position actuelle sur le marché et dans la chaîne de valeur de l'information alimentaire. Jusqu'à présent, peu d'applications blockchain du monde réel ont dépassé la phase de « preuve de concept » ou les projets pilotes à petite échelle (Ge et al., 2017).

Plusieurs limitations ont été trouvées pour le démonstrateur PoC. Premièrement, la quantité de données et d'informations partagées est très limitée. Comme pour la plupart des pilotes PoC, le projet n'a pas encore été en mesure de démontrer comment il fonctionnerait lors du traitement d'un grand nombre de transactions. Compte tenu de la portée limitée du projet, les implications sur les ressources et la capacité de production de notre système restent à déterminer. De plus, notre démonstrateur s'est concentré sur un seul contrat intelligent. En pratique, cependant, plusieurs contrats intelligents devraient être mis en œuvre pour différentes relations contractuelles et pour que les données de transaction ne soient visibles que pour le sous-ensemble concerné de participants. Un autre aspect qui devrait être abordé est l'interaction entre les contrats intelligents et la faisabilité des flux de données entre les contrats intelligents. Enfin, des erreurs répétées dans la conception de contrats intelligents ont démontré que les tests, la validation et une sémantique rigoureuse sont essentiels pour éviter des dommages importants aux relations commerciales. Compte tenu du niveau croissant de numérisation et de la demande d'informations et d'intégrité sur les produits, le secteur agroalimentaire est particulièrement bien placé pour explorer le potentiel de la blockchain. Bien que l'application de la blockchain dans l'industrie agroalimentaire en soit encore à ses débuts, on peut s'attendre à ce que de plus en plus d'organisations prennent l'initiative.

Les avantages d'un système de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire basé sur la blockchain comprennent :

Bénéfice de la gestion de la traçabilité. Le système de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire crée un type de chaîne d'information agroalimentaire qui englobe l'organisme de réglementation de la sécurité alimentaire, la pépinière, la ferme, le centre de manutention et d'emballage, l'entreprise de logistique, le détaillant, le consommateur,

ainsi que d'autres appareils IoT. En s'appuyant sur le système blockchain, toutes les informations agroalimentaires de la chaîne d'approvisionnement sont transparentes et ouvertes, permettant aux entreprises de logistique de mettre en œuvre un suivi en temps réel des produits agroalimentaires, aux régulateurs de mettre en œuvre une gestion de la traçabilité et aux consommateurs d'obtenir des informations complètes sur les produits tout au long de la chaîne d'approvisionnement agroalimentaire.

Bénéfice pour améliorer la crédibilité de l'information sur la sécurité alimentaire agricole. Actuellement, la plupart des systèmes de traçabilité de la chaîne d'approvisionnement reposent sur l'idée d'utiliser un système centralisé. Cependant, ces types d'organisations centralisées sont complètement opaques et le détaillant ou le consommateur ne pourra jamais connaître les détails internes des transactions. En utilisant la blockchain, ce système de traçabilité élimine le besoin d'une organisation centralisée de confiance et fournit une plate-forme d'information à tous les membres avec ouverture, transparence, neutralité, fiabilité et sécurité.

Bénéfice pour lutter contre les produits contrefaits. Les données d'information sur les produits pourraient être cryptées en reliant le produit à un identifiant, ce qui pourrait protéger le produit contre la contrefaçon. Étant donné que ce processus ne nécessite aucune opération manuelle, il réduit considérablement les erreurs causées par des facteurs humains. De plus, grâce à la technologie blockchain, les membres de ce système ne peuvent pas manipuler les informations agroalimentaires, ce qui augmente encore la sécurité des produits.

Cependant, en tant que technologie émergente, son application se heurte à certains obstacles, tels que son coût élevé et son immaturité. D'autres enjeux sont liés à la taille croissante de la chaîne agroalimentaire, en lien avec le stockage et la synchronisation des données.

Enfin, pour exploiter pleinement la puissance de la blockchain, il est recommandé aux coopératives d'adopter la blockchain. La plupart des coopératives sont trop petites ou manquent d'expérience pour investir elles-mêmes dans la blockchain. De plus, compte tenu du développement actuel de la blockchain, les incertitudes sont trop élevées pour développer un projet pilote convaincant pour les différentes parties. Il est donc important d'aborder les questions de mise en œuvre dans les programmes de recherche publique. Ainsi, l'objectif principal de la recherche ne porte pas sur la technologie blockchain elle-même, mais sur son application à des cas d'utilisation appropriés. En bref, la blockchain est une technologie prometteuse pour la compétitivité des coopératives. L'avenir proche révélera si la technologie blockchain deviendra un moyen sûr, fiable et transparent d'ajouter de la valeur aux coopératives agroalimentaires.

BIBLIOGRAPHIE :

AKKERMAN, R., FARAHANI, P. & GRUNOW, M. (2010): "Safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges", *OR Spectrum*, 32, 863-904

Ammous, Saifedean. "Blockchain Technology: What is it good for?." (2016).

Atzori, Marcella. "Blockchain Technology And Decentralized Governance: Is The State Still Necessary?" (2015).

Boucher, Philip. "What if blockchain technology revolutionised voting." Unpublished manuscript, European Parliament (2016).

Crosby, M., Pattanayak, P., Verma, S., & Kalyanaraman, V. (2016). *Blockchain Tech-Nology: Beyond Bitcoin*. *Applied Innova-Tion*, 2, 6-10.

Foroglou, George, and Anna-Lali Tsilidou. "Further applications of the blockchain." *Columbia University PhD in Sustainable Development* 10 (2015).

FOX, M.S. & GRUNINGER, M. (1998): "Enterprise Modelling", *AI Magazine*, 19(3), 109-121,

GARTNER (2017): "Top Trends in the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies".

GERRING, T. (2016): "Cut and try: building a dream - Ethereum Blog", *Ethereum Blog*. Recuperado de <https://blog.ethereum.org/2016/02/09/cut-and-try-building-a-dream/>.

GRASS ROOTS FARMERS' COOPERATIVE (2017): "How we 're using blockchain tech for total trans- parency".

IANSITI, M. & LAKHANI, K.R. (2017): "The Truth About Blockchain", *Harvard Business Review*,

Iansiti, Marco, and Karim R. Lakhani. "The truth about blockchain." *Harvard Business Review* 95.1 (2017): 118-127. January-February, 118-127.

KIM, H.M., FOX, M.S. & GRUNINGER, M. (1995): "An ontology of quality for enterprise modelling". Presentado en: *Proceedings 4th IEEE Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WET ICE '95)*, IEEE Comput. Soc. Press, 105-116.

KOSBA, A. MILLER, E., SHI, Z. & PAPAMANTHOU, C. (2016): "Hawk: The Blockchain Model of

LIN, J., SHEN, Z., MIAO, C. & LIU, S. (2017a): "Using blockchain to build trusted lorawan sharing ser- ver", *International Journal of Crowd Science*, 1(3), 270-280,.

- LV, F. & CHEN, S. (2016): "Research on Establishing a Traceability System of Quality and Safety of Agricultural Products Based on Blockchain Technology", Rural Finance Research, 12, 22-26,
- Malinova, Katya, and Andreas Park. "Market Design with Blockchain Technology." (2017).
- NAKAMOTO, S. (2008): "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System". Recuperado de: <https://bit-coin.org/bitcoin.pdf>.
- Nguyen, Quoc Khanh. "Blockchain-a financial technology for future sustainable development." Green Technology and Sustainable Development (GTSD), International Conference on. IEEE, 2016.
- Nofer, Michael, et al. "Blockchain." Business & Information Systems Engineering 59.3 (2017): 183-187.
- open source architecture for Long Range monitoring. The case study of cattle tracking at Pogoniani". Presentado en: Proceedings of the 21st Pan-Hellenic Conference on Informatics (PCI 2017), ACM, New York, NY, USA, 57(6).
- Pilkington, Marc. "Blockchain technology: principles and applications. Research handbook on digital transformations, edited by f. xavier ollerros and majlinda zhegu." (2016).
- POPPER, N. (22 mayo 2016): "A Venture Fund With Plenty of Virtual Capital, but No Capitalist", New York Times.
- REGATTIERI, A., GAMBERI, M. & MANZINI, R. (2007): "Traceability of food products: General fra- mework and experimental evidence", Journal of Food Engineering, 81(2), 347-356, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.10.032.
- SARI, K. (2010): "Exploring the impacts of radio frequency identification (RFID) technology on supply chain performance", European Journal of Operational Research, 207, 174-183, DOI: 10.1016/j.ejor.2010.04.003.
- TIAN, F. (2016): "An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology". Presentado en: Proceeding of the 13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM'16), 1-6.
- TIAN, F. (2017): "A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of things". Presentado en: International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM),
- TRIENEKENS, J.H. & ZUURBIER, J. (2008): "Quality and safety standards in the food industry, developments and challengers", International Journal of Prod. Econ, 113, 107-122,

TRIENEKENS, J.H., WOGNUM, P.M., BEULENS, A.J.M. & VAN DER VORST, J.G.A.J (2012):

TRIPOLI, M. & SCHMIDHUBER, J. (2018): Emerging Opportunities for the Application of Blockchain in the Agri-food Industry, Roma: FAO y ICTSD.

USTUNDAGA, A. & TANYASB, M. (2009): “The impacts of Radio Frequency Identification (RFID) technology on supply chain costs”, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 45(1), 29-38

WANG, L., KWOK, S.K. & IP, W.H. (2010): “A radio frequency identification and sensor-based system for the transportation of food”, Journal of Food Engineering, 101, 120-129, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.06.020.

WASS, S. (22 Agosto 2017): “Food Companies Unite to Advance Blockchain for Supply Chain Traceability”, Global Trade Review. /.

Zheng, Zibin, Et Al. "An Overview of Block-Chain Technology: Architecture, Consensus, And Future Trends." Big Data (Bigdata Congress), 2017 Ieee International Congress On. Ieee, 2017.