

Listes des contenus disponibles à [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

## L'automatisation dans la construction



Page d'accueil du journal :

[www.elsevier.com/locate/autcon](http://www.elsevier.com/locate/autcon)

Suivi des actifs préfabriqués et de la conformité à l'aide de codes à réponse rapide (QR).  
et la technologie de la blockchain et des contrats intelligents

Wouter van Groesen<sup>\*</sup> Pieter Pauwels

Département de l'environnement bâti Université de technologie d'Eindhoven, P.O. Box 513, Eindhoven 5600 MB, Pays-Bas

### ARTICLE INFO

#### Mots-clés :

Suivi des actifs

Codes à réponse rapide (QR)

Blockchain

Technologie du grand livre

distribué Contrats intelligents

Ethereum

Modélisation des données du bâtiment

### ABSTRACT

Les chaînes d'approvisionnement de la construction (CSC) se caractérisent par leur structure convergente et le système de paiement hiérarchique qui leur est intrinsèquement lié. En raison de la poursuite d'objectifs divergents et d'interdépendances mutuelles, des risques et des problèmes de confiance entre les parties prenantes apparaissent. Les contrats sont utilisés pour régir ces collaborations complexes. Pour vérifier le respect des termes du contrat, diverses activités sont exécutées par les parties prenantes concernées. Ces activités n'ajoutent aucune valeur à un produit final, entraînent une intransparence, sont coûteuses et provoquent des conflits. C'est pourquoi cet article étudie une combinaison de suivi des actifs et de technologie blockchain pour résoudre ces problèmes. Un cadre plug-and-play d'applications interactives et un flux de travail pour les exploiter sont proposés. La preuve de ce concept est fournie en développant des applications prototypes et en les testant dans divers scénarios pratiques. Un suivi simplifié des actifs tout au long des chaînes d'approvisionnement a été réalisé et relié à des contrats intelligents. Il en résulte un suivi semi-automatique de la conformité et un enregistrement immuable des transactions. Par conséquent, ce travail fournit plus d'informations sur la combinaison du suivi des actifs et de la blockchain pour le contrôle de la conformité dans le secteur de la construction. En procédant ainsi, il est possible d'automatiser davantage les processus de construction, d'accroître la transparence entre les parties prenantes et de réduire les conflits. Cependant, il reste clair que de nombreuses autres variables ont un impact sur la transparence et la confiance ; et si la technologie peut apporter des améliorations, des mesures de sécurité et de contrôle procédurales considérables sont nécessaires en plus. Par conséquent, nous nous concentrons sur la semi-automatisation des flux de travail à l'aide de la technologie des registres distribués.

### 1. Introduction

Dans le secteur de la construction, des consortiums multidisciplinaires complexes de personnes collaborent à la réalisation d'un seul projet. Ces projets doivent être réalisés dans le cadre d'un budget précis et dans un délai prédéterminé. En raison de la complexité des projets de construction, la phase de réalisation implique l'intervention de nombreux spécialistes et fournisseurs de produits, de composants et de sous-éléments pour construire un bâtiment [1]. Ces sous-éléments sont fabriqués et installés par une grande variété d'intervenants. Par conséquent, les chaînes d'approvisionnement de la construction se caractérisent par leur longueur, leur structure en réseau et l'inclusion d'un grand nombre de fournisseurs différents [2]. Cette complexité et le manque de transparence entraînent des coûts de défaillance et des conflits entre les parties prenantes [3-5].

#### 1.1. Contexte

Les relations entre deux ou plusieurs parties prenantes sont régies

par des contrats. Les contrats comprennent souvent : (1) une description des travaux et/ou des produits qui doivent être exécutés/livrés par une partie contractante, (2) la qualité requise des travaux/matériaux à la livraison, (3) un délai dans lequel les travaux/livraisons doivent être achevés, (4) un système de paiement basé sur le niveau d'achèvement des travaux/livraisons et (5) les conditions générales et les responsabilités liées aux points susmentionnés [6]. Le secteur de la construction est rempli de litiges juridiques [7]. Ces litiges peuvent résulter d'un large éventail de causes, telles que l'ambiguïté des termes du contrat, les retards de paiement et la livraison tardive ou insuffisante des travaux [4].

En raison de la complexité et du grand nombre de parties prenantes impliquées dans les projets de construction, le nombre de contrats et leur complexité sont également élevés. Ces contrats sont principalement gérés en interne dans chacune des organisations des parties prenantes. En outre, chaque partie prenante exécute diverses activités pour vérifier si les autres parties prenantes respectent les termes de leur contrat et se conforment à leurs obligations. Les contrôles de qualité, le suivi de la planification et la vérification des paiements sont des exemples de ces activités [4,6]. Comme chaque partie prenante vérifie individuellement si les produits

---

\* Auteur correspondant.

*Adresse électronique* : [w.v.groesen@tue.nl](mailto:w.v.groesen@tue.nl) (W. van Groesen).

<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104420>

Reçu le 8 septembre 2021 ; Reçu sous forme révisée le 5 mai 2022 ; Accepté le 6 juin 2022.

Disponible en ligne le 15 juin 2022

0926-5805/© 2022 Les auteurs. Publié par Elsevier B.V. Cet article est en accès libre sous la licence CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

(actifs) ou les services sont livrés à temps, la gestion et le suivi des actifs sont exécutés séparément. En outre, ces activités de suivi des actifs et leur enregistrement sont souvent exécutés via des procédures manuelles inefficaces. Comme ces activités et leur enregistrement manquent de transparence et sont sensibles aux erreurs, ils provoquent des lacunes dans la communication entre les parties prenantes [2]. Ces lacunes de communication sont à la base de problèmes de confiance et de défauts qui entraînent des conflits et des coûts d'échec [3]. Le maintien de ces systèmes de suivi des actifs dans une chaîne d'approvisionnement fragmentée n'est pas considéré comme une valeur ajoutée pour le client final [8,9]. Par conséquent, ces activités inefficaces et décentralisées doivent être abordées pour augmenter la confiance et réduire les conflits. Bien que ces activités inefficaces et décentralisées ne soient pas la seule cause du manque de confiance entre les parties prenantes, leur résolution contribuerait de manière significative à la réduction des conflits.

### 1.2. Suivi des actifs et blockchain

La gestion actuelle de l'ingénierie de la construction souffre de nombreux défis concernant la confiance, le partage de l'information et l'automatisation des processus [10]. Le suivi des biens physiques (PAT) et la gestion des biens numériques (DAM) doivent donc être abordés pour accroître la transparence et la confiance. Diverses technologies et flux de travail sont prometteurs et existent pour aider à atteindre cet objectif [11]. Les technologies de suivi géospatial et les systèmes de gestion des actifs connexes sont par exemple largement appliqués en dehors du secteur de la construction pour remplacer le suivi manuel des actifs [12]. On trouve de plus en plus d'exemples de leur application dans les cas d'utilisation de la construction également [13,14]. Dans le secteur de la construction, la collaboration accrue entre les parties prenantes et l'échange d'informations dans les modèles BIM améliorent les pratiques actuelles [15]. La combinaison des modèles BIM avec des données en temps réel et leurs avantages sont également démontrés dans d'autres travaux [16]. D'autres technologies émergentes qui contribuent à la transparence et à la confiance sont les blockchains et les contrats intelligents [17-19].

Comme l'utilisation de la technologie blockchain permet la construction d'un journal distribué et immuable comme source unique de vérité, son application dans les collaborations complexes est considérée comme favorable [19,20]. Comme la transparence et la traçabilité sont créées dans un grand livre géré conjointement, son application réduit les écarts de communication et les conflits entre les parties prenantes [11,21]. Dans le prolongement, les contrats intelligents qui fonctionnent sur la blockchain peuvent être déployés pour semi-automatiser la comparaison entre la réalité et les termes du contrat. En outre, le besoin d'intervenants intermédiaires (banques) et les retards sont éliminés car ces contrats s'exécutent instantanément dès que les termes du contrat sont remplis [6,22]. La combinaison de la blockchain, des contrats intelligents et du suivi des actifs n'est pas un concept nouveau. Des travaux antérieurs ont démontré les mérites et les inconvénients de leur combinaison dans et en dehors de l'industrie de la construction [11,23,24]. Bien qu'il existe encore des obstacles à l'application conjointe de ces technologies, il est largement reconnu que le secteur de la construction est prêt pour un tel changement socio-technique [8,25].

Par conséquent, une exploration plus approfondie de ces concepts, de leur combinaison et de leur application dans la pratique est nécessaire. Nous cherchons donc à résoudre dans une certaine mesure des problèmes tels que la confiance et la transparence dans ce travail en combinant et en testant ces technologies dans un cas d'utilisation industrielle. Pour ce faire, nous visons à semi-automatiser les activités de suivi des actifs et de la conformité pour les grands actifs préfabriqués tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

### 1.3. Plan de recherche

Tout d'abord, une large revue de la littérature est réalisée sur le suivi des actifs, la gestion, la blockchain et les contrats intelligents. Les recherches existantes sur la combinaison de ces technologies sont passées en revue, une lacune dans la recherche est identifiée, puis un modèle conceptuel est présenté dans la section 2. Le modèle conceptuel proposé est étendu à un cadre d'applications en interaction. Plusieurs prototypes individuels statiques et dynamiques sont développés et présentés dans la section 3. L'interaction mutuelle entre

Ces prototypes et leur interaction sont ensuite testés dans quatre scénarios industriels distincts, présentés dans la section 4. Ces prototypes et l'interaction entre eux sont ensuite testés dans quatre scénarios distincts basés sur l'industrie, comme présenté dans la section 4. L'article se termine à la section 5 par une vue d'ensemble, des conclusions et des travaux futurs.

## 2. Revue de la littérature

Dans un premier temps, nous aborderons la définition correcte des actifs et des systèmes qui les traitent dans la section 2.1. Dans la section 2.2, nous examinons comment les biens numériques sont gérés dans l'environnement bâti au moyen de modèles BIM. La section 2.3 aborde les technologies possibles pour le suivi des biens physiques au moyen de capteurs. L'état actuel et les possibilités de la technologie du grand livre distribué et des contrats intelligents sont présentés dans la section 2.4. L'analyse documentaire se termine par l'identification d'une lacune dans la recherche et la présentation d'un modèle de recherche dans les sections 2.5 et 2.6 respectivement.

### 2.1. Actifs et systèmes d'actifs

Un actif est défini par la norme ISO (2014:55000) comme étant : " *un article, une chose ou une entité qui a une valeur potentielle ou réelle pour un organisme* " [26]. La valeur d'un tel actif peut varier au cours de son cycle de vie ainsi qu'entre les organisations. La valeur d'un actif peut inclure la prise en compte des risques et des éléments suivants

le passif. Par conséquent, la valeur peut être positive ou négative à différents stades de la vie d'un actif. Les actifs ainsi que leur valeur peuvent être subdivisés en types d'actifs corporels ou incorporels et financiers ou non financiers. Les types d'actifs sont un groupe d'actifs qui partagent des caractéristiques distinctes communes qui les définissent en tant que groupe (par exemple, numérique et physique). Les actifs physiques sont considérés comme des actifs tangibles et peuvent faire référence à des équipements, des matériaux, des propriétés ou des ressources humaines détenus par une entreprise. Les actifs numériques sont des actifs intangibles non physiques qui peuvent faire référence à des accords, des droits d'utilisation et des propriétés intellectuelles [26-28].

En outre, selon l'ISO (2014:55000), un système d'actifs est constitué de : " *des actifs qui interagissent ou sont interreliés car ils partagent des propriétés communes* " [26]. Les actifs numériques (par exemple, le modèle d'un mur) peuvent être interreliés à des actifs physiques (le mur physique) et sont donc considérés comme un système d'actifs. Les actifs critiques et les systèmes d'actifs critiques sont considérés comme des actifs ayant un impact significatif sur la réalisation des objectifs de l'UE.

une organisation. Les actifs critiques peuvent être : (1) critiques en termes de sécurité, (2) critiques en termes d'environnement et (3) critiques en termes de performance et peuvent être liés à des exigences légales et à des obligations contractuelles [15,29].

Dans un contexte d'environnement bâti, les éléments de construction préfabriqués peuvent être considérés comme des actifs physiques, tandis que leurs conceptions peuvent être considérées comme des actifs numériques. Comme ils sont liés entre eux par leur identité commune, ils peuvent être considérés comme un système de biens. Si les deux actifs sont capables de communiquer en temps réel, l'actif numérique est un jumeau numérique. Les éléments préfabriqués ont généralement une valeur élevée car leur création nécessite des investissements substantiels de la part de multiples parties prenantes. Pendant la phase de construction d'un projet, les activités liées aux éléments préfabriqués peuvent revêtir une grande importance en raison de leur présence sur le chemin critique d'un planning d'exécution. Les éléments préfabriqués peuvent donc être considérés comme des actifs dont la performance est critique pendant la phase de construction.

### 2.2. Gestion des actifs numériques

L'utilisabilité d'un modèle BIM dans les différentes phases est exprimée par le niveau de développement du modèle (LOMD), comme le montre la figure 1. Actifs numériques



Fig. 1. Niveaux de développement du modèle BIM (LOMD).

qui sont représentés dans les modèles BIM en tant que système d'information sont transférés dans la réalité physique pendant la phase de construction [30]. Par conséquent, le transfert du LOMD 400 "tel que planifié" (y compris les données de planification et de coût) au LOMD 500 "tel que construit" est initié pendant cette phase. Au fur et à mesure que les données relatives aux biens physiques sont traitées dans le système d'information, l'état "tel que construit" est représenté dans l'environnement numérique. Un tel modèle "tel que construit" peut être utilisé pendant et après la phase de construction pour la gestion des performances et du cycle de vie [31]. Cependant, pour permettre une gestion efficace des performances et du cycle de vie, le système d'information doit inclure des données sur les biens physiques qui sont régulièrement mises à jour [32,16]. Pour progresser vers un modèle "tel que construit" mis à jour et donc une mise à jour (presque) en temps réel d'un environnement numérique avec des données de l'environnement physique, la technologie des capteurs doit être mise en œuvre. Les outils BIM peuvent être considérés comme une possibilité de passer de l'état planifié à l'état construit [33]. Cependant, des obstacles à la mise en œuvre persistent pour combiner les données de l'IdO avec les modèles BIM [24]. Bien qu'un tel modèle ne doive pas nécessairement être réalisé à l'aide d'outils BIM, il est préférable de pouvoir consommer des ensembles de données BIM dans différents formats pour diverses raisons (par exemple, obligations liées à la planification, aux coûts et aux données contractuelles) [32]. Des technologies alternatives permettant d'atteindre le même objectif (par exemple, DLT ou bases de données) sont disponibles et prometteuses [16,31,32,34].

### 2.3. Suivi des biens physiques

Pour automatiser la mesure de l'avancement et, par la suite, le respect des obligations contractuelles en termes de planification, les éléments individuels (préfabriqués) peuvent être identifiés grâce aux technologies de suivi géospatial [9,12]. Les technologies de suivi géospatial permettent d'interagir avec des actifs physiques en communiquant avec des étiquettes ou des capteurs (géomarquage). Ces étiquettes/capteurs sont couplés à l'identité des biens individuels et, par conséquent, les emplacements individuels peuvent être identifiés (soit par des dispositifs de balayage, soit par les étiquettes elles-mêmes). La manipulation de l'état des biens individuels peut donc se faire par le biais de l'emplacement ou d'un logiciel afin de communiquer la progression [35,36]. Sur la base des progrès réalisés sur le site ou hors du site par rapport aux progrès souhaités dans les obligations du contrat, la conformité ou la non-conformité peut être déterminée [6, 11, 37]. Les technologies de suivi des actifs géospatiaux qui sont largement appliquées dans l'industrie sont les suivantes : (1) les codes de réponse rapide (QR), (2) l'identification par radiofréquence (RFID), (3) la bande ultra-large (UWB) et (4) les systèmes de positionnement global (GPS).

Le déploiement de technologies d'imagerie constitue une alternative à la technologie de suivi géospatial pour la mesure de la progression sur le site et donc de la conformité [12,38]. La technologie d'imagerie est utilisée pour capturer des images numériques afin de générer des informations 3D concernant divers objets sur les sites de construction. Ces informations 3D sont utilisées pour analyser l'avancement de la construction par comparaison avec une représentation 3D de l'avancement souhaité de la construction [9,38]. Comme le démontrent les travaux d'El- Omari et Moselhi (2008), les technologies d'imagerie capturent l'état/la situation "tel que construit" de plusieurs biens dans une image. Après avoir comparé une image à une situation 3D "telle que planifiée", il est possible de déterminer l'identité des biens individuels ainsi que les divergences en termes de progression de la construction [9,35,38,39]. Sur la base de cette comparaison, l'avancement du chantier peut être déterminé et la conformité/non-conformité peut être communiquée. Les technologies d'imagerie comprennent (1) la photogrammétrie, (2) le balayage laser 3D, (3) la vidéogrammétrie et (4) les images de portée [9,12,38].

Les technologies géospatiales sont plus adaptées à une application tout au long d'une chaîne d'approvisionnement car elles peuvent collecter des données à la fois sur site et hors site [10,13,39]. Comme la plupart des technologies géospatiales nécessitent l'utilisation d'une procédure de balayage, une semi-automatisation de l'acquisition des données peut être réalisée [12,40]. Comme l'ont montré Yavaraj et Sangeetha (2016), le GPS peut permettre une automatisation complète car aucune procédure de balayage manuel n'est nécessaire pour acquérir des données [41]. En termes d'efficacité temporelle de ces procédures, les scanners QR sont limités à l'acquisition de données d'un seul actif physique, mais ne nécessitent pas d'équipement spécial et donc d'investissements. La RFID et l'UWB peuvent acquérir des données provenant de plusieurs biens simultanément,

W. van Groesen et P. Pauwels, mais nécessitent un équipement supplémentaire (par exemple, un scanner RFID). Le GPS ne nécessite pas d'équipement supplémentaire (outre les capteurs) et peut également collecter des données relatives à plusieurs biens.

Bien que les technologies géospatiales soient adaptées à l'acquisition de données tout au long des étapes de la chaîne d'approvisionnement, il n'est ni souhaitable ni faisable d'appliquer cette technologie à tous les éléments de construction (par exemple, une étiquette/capteur pour chaque brique). Par conséquent, la technologie géospatiale est mieux adaptée au suivi des grands éléments préfabriqués tout au long de la chaîne d'approvisionnement en menant des procédures (semi-) automatisées [14,35]. Kopsida et al (2015) indique que l'installation et la maintenance des étiquettes RFID nécessitent beaucoup de temps, ce qui n'est pas souhaitable [12]. La maintenance de ces étiquettes peut être un problème si elles sont appliquées pendant de longues périodes (par exemple, pendant toute la durée de vie d'un bâtiment). Lorsqu'elles sont appliquées pendant une courte période (par exemple, pendant la phase d'exécution uniquement), le besoin de maintenance est considéré comme peu probable [13,40]. En termes d'application des technologies d'imagerie, l'utilisation est limitée à la capture des conditions sur site [9]. Par conséquent, seul l'état d'exécution des éléments de construction peut être enregistré. L'acquisition de données par les technologies d'imagerie peut être automatisée si aucune intervention humaine n'est requise (par exemple, la mise en place du scanner) [12]. En outre, les investissements en termes de ressources pour installer et entretenir les étiquettes ne sont pas nécessaires [40]. Comme la technologie de numérisation ne nécessite pas la présence d'étiquettes pour vérifier l'identité d'un élément de construction, elle est plus viable pour mesurer l'avancement de la construction (4D) [33]. Comme nous l'avons vu précédemment, il n'est ni faisable ni souhaitable d'équiper chaque brique d'un capteur afin de mesurer l'avancement des travaux par le biais de la géo-localisation.

les technologies spatiales.

Afin de progresser vers un suivi (semi-) automatisé de la conformité, le suivi de l'avancement dans le monde physique doit être effectué à la fois sur site et hors site pour couvrir l'intégralité de la chaîne d'approvisionnement (jumelage numérique) [16,32]. Par conséquent, les technologies géospatiales doivent être envisagées pour les composants de construction importants et précieux (éléments préfabriqués). Cependant, si nous ne nous limitons pas à la mesure de l'avancement des éléments préfabriqués, mais que nous voulons permettre une mesure complète de l'avancement de la construction à l'avenir, l'utilisation supplémentaire de la technologie d'imagerie est définitivement requise [9,33].

## 2.4. Technologie du grand livre distribué

La DLT peut être définie comme un consensus de données numériques répliquées, partagées et synchronisées, géographiquement réparties sur plusieurs sites, pays ou institutions où il n'y a pas d'entité unique de contrôle [42]. Nawari et al. (2019) définissent la technologie du grand livre distribué comme étant : " *un grand livre public numérisé et décentralisé des données, des actifs et de toutes les transactions pertinentes qui ont été exécutées et partagées entre les participants du réseau* " [19]. Les DLT sont constitués d'une chaîne de blocs qui contiennent des informations et sont chiffrés par une fonction de hachage cryptographique fournie par un algorithme. Les transactions représentant une valeur sont regroupées au sein de ces blocs, sont vérifiées et validées par un mécanisme de consensus au sein d'un réseau distribué de pair à pair [18]. La technologie des grands livres distribués (DLT) offre donc des possibilités dans lesquelles les données sont stockées de manière sûre, transparente, immuable et distribuée. La technologie DLT est actuellement utilisée de manière intensive dans les secteurs qui dépendent fortement des transactions financières et de l'échange d'informations [25]. En raison de l'immuabilité de la DLT, les transactions au sein du système sont sécurisées et peuvent contribuer à réduire le manque de confiance

[11,17,43]. Nakamoto (2019) ajoute que la DLT offre une certitude marquée par un consensus complet, la provenance, la fiabilité et l'immuabilité [44]. On considère que la mise en œuvre réussie de la technologie DLT modifiera profondément non seulement les services et les produits, mais aussi la façon dont le travail est structuré. Les fonctionnalités d'un système DLT permettent : (1) la protection des participants, (2) la réduction des problèmes de confiance, (3) la suppression des barrières d'information et (4) l'évitement des frais de procès [14].

### 2.4.1. Contrats intelligents

Le terme "contrat intelligent" a été développé et défini pour la première fois par le cryptographe Nick Szabo en 1997 [45]. Les contrats intelligents sont définis comme suit :



"un protocole de transaction informatisé qui exécute les termes d'un contrat". Les objectifs généraux des conceptions de contrats intelligents sont de satisfaire les conditions contractuelles courantes, de minimiser les attentes et de minimiser le besoin d'intermédiaires de confiance [45]. Mason (2017) affirme que les contrats intelligents peuvent être définis comme des "contrats entièrement exécutables sans intervention humaine" [6] ou "auto-renforçants, surveillant les entrées externes provenant de sources de confiance afin de régler selon les stipulations du contrat" [46]. Les contrats intelligents sont considérés comme une couche supérieure de la DLT. En raison de leur capacité à exprimer des exigences sous forme de scripts lisibles par un ordinateur L'application d'une telle technologie pourrait apporter des avantages considérables si elle était combinée au suivi et à la gestion des actifs [11, 17, 43]. Une combinaison de DLT (technologie de grand livre), de BIM (plan d'exécution numérique) et de contrats intelligents (scripts lisibles par ordinateur) peut être déployée pour automatiser certains aspects des clauses contractuelles traditionnelles. Mason (2017) discute que le document juridique clé lui-même, le contrat, a le potentiel de devenir automatisé bien que certains défis (par exemple, l'assurance qualité) soient identifiés [6]. Shojaei et al (2019) soutiennent cet argument et affirment que les processus de conformité liés à la qualité nécessitent toujours une intervention humaine dans une certaine mesure [7]. Bien que divers efforts aient été observés en se concentrant sur (par exemple, les processus d'assurance qualité automatisés), les mérites de l'élimination de toute intervention humaine ne sont pas souhaitables [6,47]. Par conséquent, il pourrait être difficile de tirer parti de tous les avantages des grands livres distribués dans le secteur de la construction. Les activités de conformité manuelles inefficaces liées à la livraison des produits/à l'avancement de la construction, aux obligations financières (par exemple, les paiements) ainsi qu'aux processus de conformité liés à la qualité, peuvent être (partiellement) automatisées. La mise en œuvre de la technologie des capteurs basée sur l'Internet des objets (IoT) permet de suivre les actifs physiques [43]. L'IdO offre donc des possibilités d'automatisation supplémentaire en complément des processus intégrés DLT, contrats intelligents et BIM [7, 11, 48].

#### 2.4.2. Blockchain Ethereum

Les contrats intelligents sont généralement intégrés à une blockchain et fonctionnent sur la base des données présentes sur la blockchain sur laquelle ils résident. Tous les réseaux de blockchain ne sont pas équipés pour intégrer des fonctionnalités de contrat intelligent, comme la célèbre blockchain Bitcoin. L'une des principales blockchains qui permet d'intégrer des fonctionnalités de contrat intelligent est la blockchain Ethereum [49-51]. Outre le nœud matériel sur lequel tourne un client Ethereum, l'infrastructure du réseau de la chaîne de blocs Ethereum (ETH) est divisée en six couches. Ces couches sont les suivantes : (1) l'infrastructure, (2) les données, (3) le consensus, (4) le réseau, (5) l'exécution et (6) la gestion. (6) l'application. Ces couches sont représentées à la figure 2.

La couche d'infrastructure est constituée de nœuds (un pour chaque partie de la chaîne d'approvisionnement) organisés en un réseau pair-à-pair (P2P). Tous les nœuds partagent un seul grand livre distribué et décentralisé. Chaque nœud est lié à un compte externe (EOA) avec une adresse de compte unique. Les données relatives à chaque adresse individuelle (par exemple, le solde) sont stockées dans des essais d'état de compte distincts (structures arborescentes), qui sont fusionnés en un seul livre de comptes.

trie de l'état du monde [50-52]. Par la suite, l'état du monde trie à un moment précis est stocké dans des blocs. Ces blocs sont enchaînés au moyen d'un algorithme de hachage qui assure l'immuabilité et la sécurité du grand livre partagé. Ainsi, une source unique de vérité est créée. Comme un consensus doit être atteint entre les nœuds pour ajouter des blocs au grand livre partagé, un algorithme de consensus est utilisé dans la couche de protocole. L'algorithme de consensus Proof of Authority (PoA) est le mieux adapté aux collaborations en environnement construit, car le pouvoir est égalisé entre les nœuds, indépendamment de la puissance de calcul des nœuds ou de la taille des enjeux.

Le système PoA diffère donc des autres algorithmes de consensus tels que le Proof of Work (PoW) ou le Proof of Stake (PoS) [51]. Cela est principalement dû à la présence de nœuds de validation qui ne mettent pas en jeu la valeur mais la réputation. Ainsi, le réseau est sécurisé par des nœuds prédéfinis dont l'identité peut être connue des autres nœuds du système. En raison du manque d'anonymat et de l'absence de récompenses pour les mineurs, l'algorithme PoA est mieux adapté aux besoins des réseaux privés basés sur un consortium [53]. En ce qui concerne la couche réseau, la structure de réseau P2P la mieux adaptée à l'environnement bâti est le modèle de permission basé sur un consortium [21,54]. Cette structure permet à tous les nœuds de visualiser les transactions et d'engager des transactions dans des blocs. Cela peut contribuer à une plus grande transparence et potentiellement au développement de la confiance [55]. Les capacités d'écriture des transactions sont limitées aux nœuds qui ont un intérêt dans une transaction. Par conséquent, l'extensibilité du réseau ainsi que la lutte contre les erreurs et les abus sont assurées [49, 50, 56].

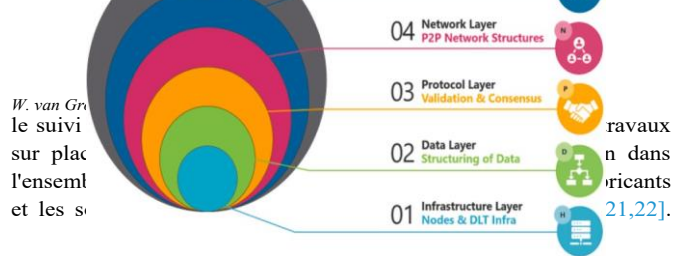
#### 2.4.3. Couche application

La dernière couche de l'infrastructure blockchain de l'ETH est la couche applicative, où les utilisateurs interagissent avec le registre distribué. La couche d'application est connectée à la couche d'exécution sur laquelle les transactions avec les contrats intelligents sont exécutées. Les contrats intelligents, qui peuvent comparer l'état prévu à l'état réel au moyen de calculs, résident dans la couche d'exécution. Les smart contracts sont développés, compilés et déployés ultérieurement sur la blockchain par une EOA. Les EOA sont capables d'interagir (valeurs d'entrée) au moyen de transactions pré-signées avec les fonctions du contrat [51]. Ces transactions peuvent être programmées pour être exécutées à l'avenir au moyen du réveil d'Ethereum. Sur la base de ces entrées et du code de calcul du contrat intelligent, un calcul (semi-) automatisé des résultats est réalisé (paiements et notifications).

#### 2.5. Lacunes de la recherche

D'autres recherches ont été menées sur la technologie blockchain et les contrats intelligents pour le suivi des actifs dans la construction. Lee et al. (2021) proposent une combinaison entre les jumeaux numériques et la technologie blockchain pour assurer la communication de données traçables [57]. Dans le cadre de leur recherche, un réseau blockchain est créé sur Microsoft Azure et une interaction avec un jumeau numérique dans Unity est établie. Les données hypothétiques du PAT sont communiquées à un jumeau numérique en temps quasi réel, après quoi les données sont enregistrées sur la chaîne. Cela permet la création d'une source unique de vérité entre les parties prenantes collaborant, un suivi plus efficace des progrès et la transparence. Bien que les paiements semi-automatiques ne soient pas réalisés, une source unique de vérité peut permettre cette fonctionnalité [57-59]. Les potentialités de l'application des contrats intelligents pour intégrer les flux matériels et financiers tout au long de la chaîne d'approvisionnement sont largement reconnues [54,60]. Cependant, son application réelle dans des exemples concrets de ces technologies combinées est encore rare [10,23,25].

La plupart des recherches combinent les contrats intelligents avec



**Fig. 2.** Couches de la blockchain Ethereum.

Automatisation dans la construction 141 (2022)

L'intégration du suivi des actifs sur site et hors site est pourtant essentielle pour obtenir les avantages encourus par l'utilisation de la blockchain. En outre, ces techniques de suivi des actifs sont le plus souvent intégrées de manière hypothétique par des systèmes artificiels.

<sup>1</sup><https://www.ethereum-alarm-clock.com/>



la création d'un modèle tel que construit [5, 20, 22, 57, 61]. Bien que cela nous donne un meilleur aperçu de la combinaison de la PAT et de la DLT, ces idées doivent être vérifiées au moyen d'une application réelle. L'application des contrats intelligents et des techniques de suivi des actifs dans les cas d'utilisation de la chaîne d'approvisionnement de la construction est limitée et doit donc être abordée.

## 2.6. Modèle de recherche

Nous visons à obtenir une meilleure compréhension de la façon dont les techniques de suivi, la blockchain et les contrats intelligents peuvent être déployés conjointement pour le suivi des actifs/de la conformité tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Pour ce faire, nous avons l'intention de combiner les sorties de suivi par code QR (état tel que construit) avec l'état tel que prévu dans les contrats intelligents. Par conséquent, les plans numériques (de livraison des actifs), la DLT, les contrats intelligents et les systèmes de suivi des actifs physiques seront combinés comme le montre la figure 3.

Pour permettre le suivi de la conformité et les paiements automatisés, il faut une communication en temps (quasi) réel entre le numérique et le physique. Les obligations contractuelles (planification et coûts) doivent être incluses dans un système d'information pour établir l'état planifié (par exemple, modèle BIM LOMD 400). Au fur et à mesure que les activités physiques sont menées, les données sur l'état des actifs physiques doivent être acquises, communiquées et traitées dans l'environnement numérique [16,31,32]. Dans l'environnement numérique, des analyses de données automatisées doivent déterminer si les biens dans l'environnement physique sont conformes ou non à l'état prévu des éléments jumeaux dans l'environnement numérique. En fonction du résultat de cette comparaison, l'environnement numérique est capable de récompenser (financièrement) ou de communiquer la non-conformité, afin de permettre des actions correctives dans l'environnement physique. Les technologies géospatiales permettent une (semi-) automatisation de l'acquisition des données dans l'environnement physique et de leur traitement dans les environnements numériques. Les comparaisons semi-automatisées entre l'état prévu et l'état réel, y compris le retour d'information en conséquence (par exemple, les paiements) sont moins apparentes. Mason (2019) indique que les contrats intelligents peuvent être : (1) indépendants (par exemple, liés à un seul actif physique), (2) dotés d'une fonctionnalité claire (par exemple, la vérification de la conformité de l'emplacement et de la planification) et (3) exécutés sur la base de protocoles (par exemple, des transactions financières entre les parties prenantes) [37]. Distribué

La technologie du grand livre (DLT) et les contrats intelligents peuvent donc contribuer à cet objectif. Un aperçu des transactions des contrats intelligents (par exemple, par le biais d'un tableau de bord) est nécessaire pour permettre aux acteurs du secteur d'anticiper. Afin de tester la rigidité d'un tel système et de mieux comprendre son fonctionnement dans la pratique, des applications doivent être testées dans des cas d'usage industriels.

## 3. Cadre pour les contrats intelligents

Sur la base de l'examen de la littérature effectué à la section 2, nous proposons de combiner la PAT, la DAM et la DLT. Dans un cadre simplifié présenté à la figure 3, nous proposons une telle connexion pour permettre de tirer parti des avantages de la technologie blockchain. La combinaison de ces environnements au moyen d'applications permet aux partenaires industriels d'utiliser divers systèmes (existants ou nouveaux) de suivi et de gestion des actifs, et de les connecter aux contrats intelligents et à la technologie blockchain. L'objectif de l'application conjointe de ces applications et de la technologie DLT est de réduire le nombre d'activités manuelles de vérification de la conformité et de créer un registre immuable des actions/transactions. L'objectif principal de la recherche présentée est donc de fournir une première preuve de travail. Le cadre de travail pour la combinaison des applications afin d'atteindre ces objectifs est décrit dans la figure 4.

Pour réaliser un contrôle de conformité semi-automatique par des smart contracts, les fonctionnalités suivantes doivent être satisfaites : (1) la migration des données vers et depuis la blockchain doit être activée dans les applications de suivi/gestion des actifs, (2) un journal immuable des activités (états des actifs) doit être généré sur la blockchain, (3) les contrats intelligents doivent pouvoir interpréter les résultats d'une comparaison entre les états des actifs et les stipulations du contrat, (4) la distribution semi-automatique de jetons (argent) aux parties prenantes doit être réalisée et (5) le déploiement combiné de ces applications doit être suffisamment rigide pour faire face à de multiples scénarios sectoriels.

Le cadre présenté est d'abord divisé en plusieurs composants individuels qui sont développés en prototypes statiques individuels (maquettes vi- sales), après quoi des prototypes dynamiques sont développés (fonctionnels). Ces prototypes sont vérifiés par des tests alpha au sein de l'équipe de développement qui comprend des partenaires universitaires et industriels. Une fois les applications suffisamment testées, les prototypes dynamiques individuels sont développés plus avant. Ces efforts de développement se concentrent sur l'interaction mutuelle entre les applications pour permettre une semi-automatisation des activités de vérification de la conformité et des paiements. Dans l'ensemble, la méthodologie agile de développement de prototypes incrémentaux (IPD) est suivie. Cette méthode est souvent utilisée dans les projets qui comportent beaucoup de développement de logiciels. L'IPD vise à concevoir et à développer des "artefacts" ou des objets qui aident à résoudre les problèmes dans la pratique [62,63]. Chacun des composants de ce cadre est développé dans cette recherche, et sera expliqué un par un dans les sections suivantes. Le développement d'une application de suivi des biens physiques pour acquérir les états actuels des biens est abordé dans la section 3.1. La section 3.2 traite de la saisie des paramètres contractuels dans un modèle BIM et de leur extraction. La centralisation des états actuels des biens et des paramètres contractuels dans une base de données est abordée à la section 3.3. Le lien entre les détails de la base de données et les contrats intelligents au moyen d'un oracle est présenté à la section 3.4. Le développement et l'utilisation des contrats intelligents et de la blockchain Ethereum sont abordés dans les sections 3.5 et 3.6 respectivement. Les comptes EOA permettant les transactions avec les contrats intelligents sont conservés sur Metamask.<sup>2</sup>, ce qui est abordé dans la section 3.7. La Section 3.8 présente le développement d'une WebApp de tableau de bord permettant de suivre les résultats des smart contracts.

Enfin,  
sont testés  
fonction



et leur  
laborés

en collaboration avec un grand entrepreneur des Pays-Bas. Ce  
partenaire industriel propose

**Fig. 3.** Cadre proposé pour les contrats intelligents.

<sup>2</sup> <https://metamask.io/>

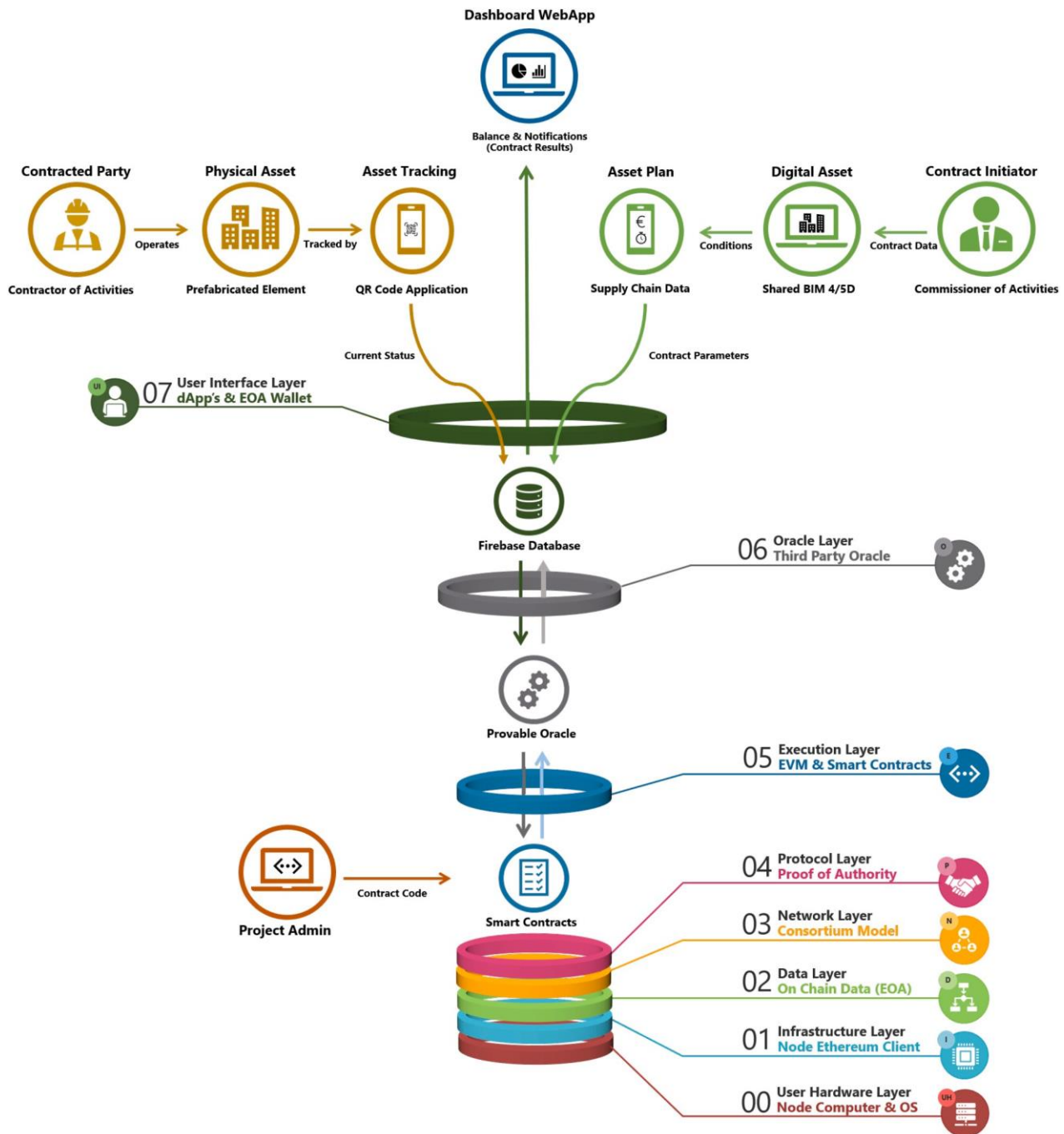


Fig. 4. Cadre d'application des contrats intelligents.

des scénarios basés sur leur expérience d'un pilote de suivi des actifs. Au cours des cycles de tests alpha et bêta, les artefacts créés sont testés au moyen de ces scénarios. Pendant ces tests, la satisfaction des contraintes/exigences prédéterminées est contrôlée et enregistrée. Ainsi, des expériences structurées sont exécutées dans les deux cas.

### 3.1. Suivi des biens physiques

Pour permettre aux acteurs de la construction d'acquérir et de manipuler les données relatives aux biens physiques, une application mobile de code QR entièrement fonctionnelle est développée. Le développement d'une application QR-code plutôt que d'une application RFID est préféré en raison d'un temps de développement plus court. Une interface utilisateur statique un storyboard de l'application est créé et vérifié auprès de l'industrie.

L'application QR est codée à l'aide de l'application MIT App Inventor. <sup>3</sup>L'application dynamique permet de capturer les états des biens physiques en scannant les GUID des biens intégrés dans les codes QR. Les états disponibles dans l'application sont les suivants (1) fabriqué, (2) livré, (3) prêt à être assemblé, (4) assemblé, (5) prêt à être vérifié et (6) vérifié.

L'application PAT est conçue pour être utilisée par : (1) les fabricants, (2) les sous-traitants, (3) les entrepreneurs principaux et (4) les clients. Les utilisateurs sont en mesure de :

(1) se connecter à l'application, (2) sélectionner l'état du bien souhaité (les états dis- joués dépendent des identifiants de connexion), (3) scanner le code QR du bien et (4) consulter le nouvel état du bien. Si le non-respect des obligations liées à la qualité est identifié par une partie prenante : (1) un rejet

partenaires. Après des vérifications suffisantes et diverses itérations de conception, la

<sup>3</sup> <https://appinventor.mit.edu/> Automatisation dans la construction 141 (2022)  
104420

est sélectionné, (2) le défaut de qualité est capturé au moyen d'une caméra et (3) un message généré est partagé avec les autres parties prenantes. Lorsque la procédure susmentionnée est terminée avec succès, les données du bien sont stockées sur une base de données en nuage. L'interface utilisateur de l'application PAT développée et les fonctionnalités décrites sont illustrées à la [figure 5](#).

### 3.2. Gestion des actifs numériques

Outre les données relatives aux actifs physiques (état actuel des actifs), les contrats intelligents nécessitent des obligations ou des règles contractuelles connexes pour fonctionner. Pour permettre une comparaison entre ces règles et la réalité, le propriétaire du contrat doit fournir des paramètres au contrat intelligent. Ces paramètres sont également nécessaires pour permettre le transfert de jetons (argent) d'un détenteur d'enjeu à un autre. Pour assurer un lien avec les pratiques actuelles du secteur, un modèle Revit géré conjointement a été utilisé, dans lequel ces paramètres sont centralisés par les parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement. Ces paramètres sont les suivants

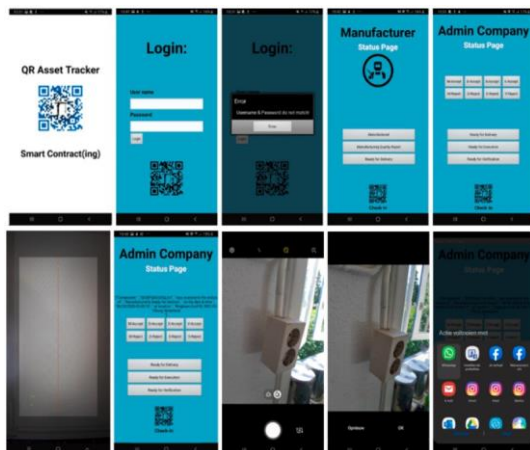
(1) une date cible (planifiée) pour chaque actif, (2) la valeur du paiement obligatoire après l'achèvement d'états d'actifs spécifiques et (3) les adresses EOA et les portefeuilles des parties prenantes impliquées sur la blockchain qui permet les transferts de jetons. Après avoir traité ces paramètres dans le modèle Revit, des planifications sont générées et converties au format JSON. Ces fichiers JSON sont ensuite utilisés pour insérer les paramètres du contrat dans une base de données en nuage. Le modèle Revit utilisé et les paramètres de contrat inclus sont présentés à la [figure 6](#).

### 3.3. Bases de données en nuage Firebase

Une fois que l'état des biens physiques a été mis à jour avec succès grâce à l'application QR-code et que les paramètres du contrat ont été extraits d'un modèle Revit, les données sont transférées vers une base de données en nuage. Outre les paramètres du contrat, les données sur les biens physiques qui sont stockées dans cette base de données sont les suivantes

(1) le GUID d'un actif, (2) la date et l'heure d'un changement d'état et (3) l'emplacement d'un actif. Dans la base de données en nuage, les données sont structurées en (1) un journal historique qui contient un enregistrement de tous les états précédents des actifs, (2) un journal d'état qui ne contient que l'état actuel des actifs et (3) un journal d'obligation qui contient tous les paramètres du contrat. Étant donné qu'un oracle de contrat intelligent peut être directement lié à l'API de Google Firebase,<sup>4</sup> cette plateforme est utilisée pour accumuler les données. La routine décrite via une base de données Firebase est en outre choisie pour permettre, à terme, des mises à jour dynamiques en ligne entre un modèle BIM et le grand livre distribué en temps réel. Étant donné qu'un flux de travail manuel annule l'objectif de l'utilisation d'un grand livre distribué, un tel lien peut éviter les exportations manuelles de fichiers et la perte de données.

**Fig. 5.** Application de suivi des biens physiques.



Property	Value
Client	0xb13620c1b12264ff46d88a3f9f...
DeliveryDate	18-05-2020
DeliveryPrice	100
ExecutionDate	20-05-2020
ExecutionPrice	125
MainContractor	0xeb400DEb7bCe7A1FF24A97E76...
Manufacturer	0xa5A2ac899e51aE106509EF997Df62368F6bde99...
Sub-Contractor	0x64eb7a27590989769179342f0F7dD1845f84f711...
Type If GUID	0LV8PId0X3IA3jJLVDPIdY
VerificationDate	25-05-2020
VerificationPrice	150

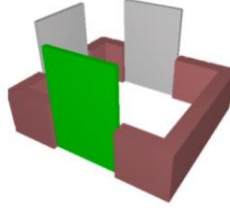


Fig. 6. Modèle Revit et paramètres du contrat.

importations. Un exemple de la structure JSON exportée contenant les paramètres du contrat est illustré à la figure 7.

### 3.4. Oracle

En raison de facteurs techniques qui empêchent l'importation de données externes à l'environnement de la blockchain, un service d'oracle est utilisé (couche 6 de la figure 4). Un oracle permet d'extraire des données de bases de données en ligne [56]. Pour extraire des données de Google Firebase, le Provable Oracle Service.<sup>5</sup> est utilisé. Les URL de Provable Oracle Service et de Firebase sont intégrées dans des contrats intelligents distincts qui sont codés et compilés dans l'environnement Ethereum Remix.<sup>6</sup> L'environnement Ethereum Remix est une plateforme sur laquelle les utilisateurs peuvent coder des contrats intelligents et interagir avec divers réseaux de test. Pour permettre la récupération des données attribuées à un actif spécifique, le GUID de l'actif est ajouté à l'URL Firebase dans le contrat intelligent. Les fonctions intégrées dans le contrat intelligent permettent de récupérer et d'importer les données souhaitées dans l'environnement DLT.

### 3.5. Contrat intelligent

En plus d'un contrat intelligent<sup>104420</sup> qui récupère les données de Google Firebase, un deuxième contrat intelligent est développé qui contient dans son code les capacités nécessaires pour comparer l'état "tel que planifié" des actifs à l'état "tel que construit". Pour ce faire, un client partie prenante extrait d'abord les obligations du contrat intelligent d'oracle et les importe dans le second. La partie prenante du client dépose ensuite un certain nombre de jetons (argent), correspondant à la valeur des contrats. Un fabricant ou un entrepreneur interagit également avec les fonctions de ce contrat intelligent en important des données sur l'état actuel des biens. Sur la base de la comparaison semi-automatique entre les deux états, le contrat intelligent identifie : (1)

```
{
  "0LV8PId0X3IA3jJLVDPIdY": {
    "DeliveryDate": "18-5-2020",
    "ExecutionDate": "20-5-2020",
    "VerificationDate": "25-5-2020",
    "DeliveryPrice": "100",
    "ExecutionPrice": "125",
    "VerificationPrice": "150",
    "Manufacturer": "0xa5A2ac899e51aE106509EF997Df62368F6bde99",
    "Sub-Contractor": "0x64eb7a27590989769179342f0F7dD1845f84f711",
    "MainContractor": "0xebA00DEb7bCe7A1FF24A97E7620d8948408EC8AA",
    "Client": "0x813620c3b12264ff46d88a3f9f4911f2Dc937d7a"
  },
  "9ae98218-0358-4959-8d8d-f7c57537397": {
    "DeliveryDate": "19-05-2020",
    "ExecutionDate": "24-05-2021",
    "VerificationDate": "26-05-2022",
    "DeliveryPrice": "110",
    "ExecutionPrice": "135",
    "VerificationPrice": "165",
    "Manufacturer": "0xa5A2ac899e51aE106509EF997Df62368F6bde99",
    "Sub-Contractor": "0x64eb7a27590989769179342f0F7dD1845f84f711",
    "MainContractor": "0xebA00DEb7bCe7A1FF24A97E7620d8948408EC8AA",
    "Client": "0x813620c3b12264ff46d88a3f9f4911f2Dc937d7a"
  }
},
```

Fig. 7. Format json des paramètres du contrat.

<sup>4</sup> <https://firebase.google.com/>

<sup>5</sup> <https://provable.xyz/>

<sup>6</sup> <https://remix.ethereum.org/>

conformité, (2) des problèmes de qualité ou (3) une non-conformité liée à la planification. Si la conformité est identifiée, le contrat intelligent : (1)

récompense une partie prenante spécifique avec des jetons déposés et (2) émet une notification de réussite. Si des problèmes de non-conformité ou de qualité sont identifiés, le contrat intelligent ne transfère pas de jetons et émet un message d'erreur. Ce message d'erreur comprend : (1) le GUID de l'actif, (2) les EOA des parties prenantes concernées, (3) le type de défaut et (4) la valeur du contrat. Sur la base de ces messages d'erreur, les parties prenantes sont en mesure de modifier les paramètres du contrat afin de garantir l'exécution ultérieure du contrat.

### 3.6. Grand livre distribué

Étant donné que les contrats intelligents sont développés dans l'environnement Ethereum Remix et déployés sur le réseau de test Ethereum Goerli, les <sup>7</sup>trans-actions avec les contrats intelligents par les EOA sont enregistrées sur une blockchain opérationnelle. Bien que divers environnements de réseau de test soient disponibles, le réseau de test Goerli est sélectionné en raison de ses similitudes avec le réseau principal de la blockchain Ethereum. Comme les contrats intelligents sont déployés sur une blockchain opérationnelle, (1) les transactions avec ces contrats, (2) les résultats des calculs et (3) les notifications des contrats intelligents sont stockés de manière immuable sur la blockchain. De ce fait, les contrats intelligents développés et les interactions avec ces contrats peuvent être examinés sur la page web Goerli Etherscan. Les <sup>8</sup>événements liés à l'un des smart contracts utilisés sont visibles dans l'onglet " événements ".

### 3.7. Metamask

Lorsque les parties prenantes interagissent avec les fonctions d'un contrat intelligent, les transactions doivent être signées pour vérifier l'identité d'une partie prenante. En outre, les parties prenantes doivent être en mesure de déposer ou de recevoir des jetons du contrat intelligent qui est stocké dans un compte de contrat intelligent sur la blockchain. Pour ce faire, les parties prenantes doivent posséder un compte externe (Externally Owned Account, EOA). Un EOA est lié à un compte unique sur la blockchain et à son propre portefeuille de crypto-monnaies. La création et le fonctionnement d'un EOA nécessitent normalement l'utilisation d'un nœud Ethereum client sur un ordinateur. Ce nœud permet à l'utilisateur de participer à un réseau de blockchain. En raison de l'exigence de plusieurs nœuds pour exécuter les expériences, des nœuds pour chaque partie prenante sont nécessaires. Pour réduire la complexité, des EOA sont créés pour chaque partie prenante dans l'environnement Ethereum Remix et liés à l'application Metamask.<sup>9</sup> L'application Metamask fonctionne comme un nœud indirect et fournit aux utilisateurs une EOA, un portefeuille et une interface utilisateur sans qu'ils aient à installer ou à exécuter des nœuds individuels localement. Dans Metamask, les parties prenantes sont en mesure de : (1) interagir avec les fonctions de contrat intelligent, (2) signer des transactions et (3) recevoir/déposer des jetons dans un contrat intelligent.

### 3.8. Webapp pour le tableau de bord

Bien que les transactions soient enregistrées sur une blockchain, la récupération des données à partir des blockchains est loin d'être idéale. Comme il est difficile d'examiner ou d'extraire les informations contenues dans la blockchain, un tableau de bord est nécessaire. Un tel tableau de bord peut être utilisé intuitivement par les parties prenantes de la construction dans des projets de construction ordinaires. Un tel tableau de bord doit fournir un aperçu des résultats de l'exécution des contrats intelligents. Grâce à ce tableau de bord, les parties prenantes sont en mesure de gérer leurs projets car il leur permet d'examiner l'état actuel des actifs, les paramètres du contrat et les transferts de

jetons. Bien que des applications de tableau de bord soient disponibles pour le réseau principal Ethereum, <sup>10</sup>elles ne sont pas disponibles pour les réseaux de test. Par conséquent, un

<sup>7</sup> <https://goerli.net/>

<sup>8</sup> <https://goerli.etherscan.io/address/0x185ca833440b4a71341fd0b3b3acecb2f420a83e>

<sup>9</sup> <https://Metamask.io>

<sup>10</sup> <https://https://ethereum.org/en/>



Les interactions avec les contrats intelligents pendant l'exécution du test sont représentées à la [figure 8](#) et seront décrites ci-après.

1. Dans les conditions préalables, le client EOA possède tous les jetons (argent) et les transfère dans le contrat intelligent pour chaque scénario.

<sup>11</sup> <https://www.smartcontracting.xyz>

Le tableau de bord WebApp.<sup>11</sup> est construit et se compose de : (1) une interface utilisateur frontale, (2) un back-end qui contient des capacités de calcul similaires aux smart contracts développés et (3) un contrôleur qui permet l'interaction entre l'interface utilisateur et le back-end. Dans Firebase, les données sur les actifs de chaque journal sont exportées dans des fichiers JSON. Ces fichiers JSON sont ensuite téléchargés via l'interface utilisateur de la WebApp du tableau de bord. Sur la base des données contenues dans ces fichiers, le tableau de bord affiche : (1) le journal historique des états des actifs, (2) tous les états actuels des éléments, (3) un aperçu des transferts de jetons et (4) un diagramme affichant le nombre d'actifs non conformes. En raison de la comparaison entre le système *"tel que planifié"* et le système *"tel qu'il est"*, le tableau de bord ne peut pas être utilisé. et l'état *"tel que construit"* d'un projet en arrière-plan, les parties prenantes sont en mesure de examiner rapidement les opérations, les finances et les contrats en amont.

#### 4. Essais et validation

Alors que les tests et la validation des composants individuels avec les partenaires industriels ont déjà eu lieu pendant le développement de tous les composants dans la section 3, l'interaction entre ces composants doit également être testée. Il est nécessaire de vérifier si le cadre construit, présenté à la [figure 4](#), fonctionne conformément aux fonctionnalités décrites à la section 3. Ces fonctionnalités sont énumérées ci-après.

1. L'application de suivi et de gestion des actifs doit pouvoir migrer les données vers et depuis la blockchain.
2. Les applications doivent être utilisables dans de multiples scénarios basés sur la pratique.
3. Un journal immuable des activités et des paiements sera créé sur la blockchain par des contrats intelligents.
4. La distribution semi-automatique de jetons (argent) aux parties prenantes sera réalisée.

##### 4.1. Préparation

Comme l'une de ces fonctionnalités implique l'applicabilité dans la pratique, de multiples scénarios basés sur la pratique sont développés. Ces scénarios sont élaborés sur la base des données pilotes PAT fournies par la société Volker-Wessels et sont décrits ci-après.

1. Une conformité totale et donc une livraison, une exécution et une vérification réussies d'un actif.
2. Non-conformité due à la violation des paramètres contractuels liés à la planification
3. Non-conformité due à la violation de paramètres contractuels liés à la qualité
4. Utilisation incorrecte de l'application PAT et donc un statut manquant

Pour tester chaque scénario, on construit un modèle fictif qui contient quatre biens préfabriqués, comme le montre la [figure 6](#). Chacun de ces biens est attribué à un scénario individuel et est équipé d'un code QR contenant un GUID. En outre, un contrat intelligent est développé et déployé pour chacun de ces actifs. Afin de tester si les résultats souhaités sont obtenus dans chaque scénario, des conditions préalables et des conditions postérieures sont rédigées. Ces conditions comprennent le solde de jetons attendu de chaque partie prenante avant et après l'exécution de tous les scénarios.

##### 4.2. Exécution

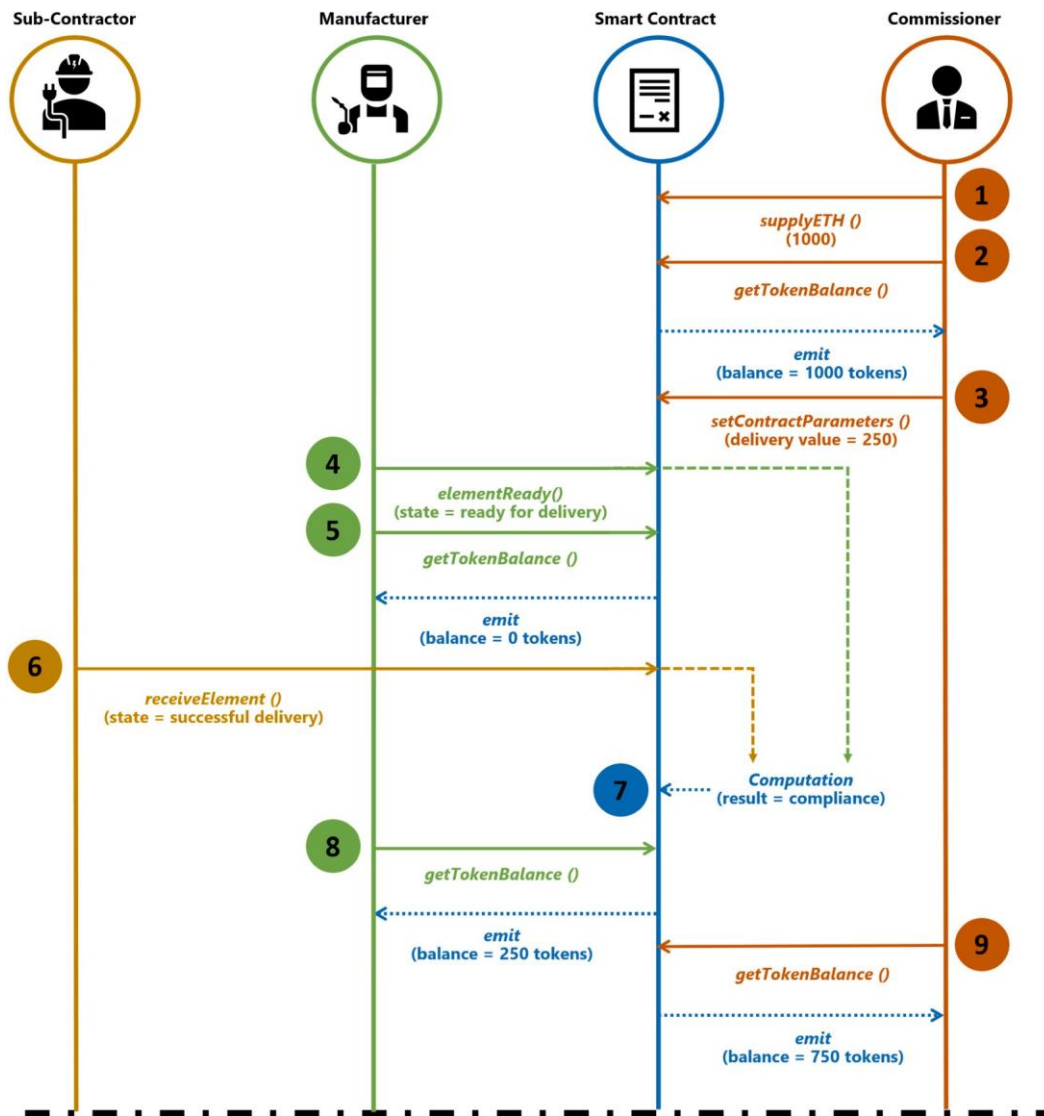


Fig. 8. Interactions des contrats intelligents dans les cas d'utilisation.

2. Le solde de l'EOA du client est contrôlé pour vérifier si le nombre correct de jetons est déposé dans le contrat intelligent.
3. Les paramètres du contrat sont insérés dans les contrats intelligents à l'aide de l'EOA du client.
4. Un acteur de la fabrication communique l'achèvement d'une tâche en mettant à jour l'état des actifs dans l'application PAT.
5. Le solde de jetons de l'acteur de la fabrication est de 0 car la livraison n'est pas encore terminée
6. Un bien est transporté sur le site de construction, après quoi l'état du bien est mis à jour par une partie prenante chargée de la vérification.
7. Sur la base des paramètres du contrat inséré et de l'état réel d'un actif, le contrat intelligent communique la conformité ou la non-conformité.
8. Si la conformité est identifiée, la partie prenante de la fabrication est récompensée avec le nombre approprié de jetons. Si la non-conformité est identifiée, un tel transfert de jetons n'est pas effectué.
9. Les jetons récompensés sont déduits du solde du client dans le contrat intelligent jusqu'à ce que toutes les étapes de production soient achevées.

du tableau de bord afin d'examiner la fonctionnalité du tableau de bord dans chaque scénario.

Enfin, les enregistrements Firebase sont téléchargés sur la WebApp

Sur la base du flux de travail décrit, quatre tests, chacun lié à un scénario individuel, sont exécutés. Pour chaque test, les résultats sont comparés aux exigences énoncées afin de vérifier si elles sont satisfaites dans chaque scénario. L'exécution des tests dans tous les environnements, leurs résultats, les suggestions d'optimisation et une brève réflexion sont présentés ci-après.

#### 4.3.1. Cadre de travail

Un modèle BIM centralisé et une base de données en nuage sont utilisés dans les scénarios testés pour les paramètres du contrat et les données de suivi des actifs. Toutefois, cela n'est pas approprié si ces modèles ou bases de données ne sont pas distribués. En outre, un administrateur est inclus dans le cadre proposé, chargé du développement, du déploiement et de l'exécution des contrats intelligents. Cet administrateur contrôle également la validité des données lorsqu'elles sont transférées entre les applications. Cet administrateur doit être remplacé à l'avenir par les parties prenantes elles-mêmes lorsque des applications décentralisées (DApps) appropriées auront été développées. Dans ce cas, toutes les données sont incorporées dans la blockchain et la validité des données est assurée par ses mécanismes intégrés. L'acquisition de données et, par exemple, les procédures d'assurance qualité seront toutefois difficiles, voire impossibles.

de se décentraliser.

#### 4.3.2. Gestion des actifs numériques

Dans le cadre testé, la présence d'un modèle BIM LOMD 400 "tel que planifié" contenant toutes les données requises sur la chaîne d'approvisionnement est utilisée. Cependant, un modèle BIM qui contient ces données dans la pratique n'est pas identifié. Par conséquent, les conditions présumées en termes de DAM ne correspondent pas entièrement à la situation dans la pratique. Cependant, les différences sont légères et sont donc supposées pouvoir être surmontées dans la pratique.

Pour permettre la combinaison du DAM avec le PAT et le DLT, les paramètres contractuels requis doivent être importés dans le contrat intelligent. Pour tester un tel flux de travail, ces paramètres doivent d'abord être traités dans Revit. Pour ce faire, un modèle contenant quatre éléments (un pour chaque scénario) est créé. Ensuite, les données requises pour chaque phase sont traitées manuellement dans Revit, notamment un prix, une date limite et les adresses blockchain des deux parties. Comme ces paramètres doivent être exportés vers la base de données en ligne et doivent donc être convertis dans un format lisible, l'exportation d'un calendrier est convertie en un fichier JSON et téléchargée sur Firebase. En utilisant le service Provable Oracle, les paramètres requis pour définir les obligations contractuelles sont récupérables par les contrats intelligents dans l'environnement Remix. Pour chacun des scénarios proposés, le flux de travail décrit a été suivi et les paramètres ont été traités en conséquence, comme le montre la figure 9.

Pour accroître l'efficacité de ce processus, les paramètres du contrat peuvent être directement insérés manuellement dans Firebase. En outre, un plugin dans un logiciel BIM ou une application DLT (DApp) dans le même but augmente également l'efficacité. L'exportation des données d'un modèle BIM au format JSON (par exemple, IFCJSON) est tout aussi efficace et correspond mieux à la pratique actuelle de l'environnement bâti. JSON est utilisé dans ce cas parce que la plupart, sinon la totalité, des développements web actuels reposent sur ce format. Cela inclut tous les environnements de développement liés à Blockchain que nous utilisons.

#### 4.3.3. Suivi des biens physiques

Outre la saisie des obligations contractuelles dans le contrat intelligent, la conformité doit également être communiquée. Pour tester l'utilisation de l'application PAT (QR) développée, un code QR contenant le GUID de l'actif est d'abord généré pour les quatre éléments fictifs (un pour chaque scénario). Pour simuler chacun des scénarios susmentionnés, ces codes QR sont scannés et l'état approprié est sélectionné. Ce faisant, un journal en ligne des activités est automatiquement créé dans la base de données Firebase, comme le montre la figure 10. De même que les obligations contractuelles, les paramètres requis pour l'exécution des contrats intelligents sont donc récupérables dans l'environnement Remix au moyen du service Oracle, comme le montre la figure 11.

Après l'exécution de tous les scénarios avec l'application PAT développée (QR) et la démonstration au partenaire industriel, on observe que l'efficacité de l'acquisition des données et de la communication des états des actifs entre les parties est améliorée par rapport à la pratique actuelle. En outre, l'exécution de ce flux de travail entraîne la centralisation des données dans une base de données en

nuage et permet l'utilisation de ces données pour l'exécution de contrats intelligents.

Fig. 9. Journal des obligations de Firebase.

```
https://obligations-smart-contracting.firebaseio.com/
├── 0LV8Pid0X3IA3jLVDPidV
│   ├── Client: "0x813620c3b12264FF46D88a3F9F4911F2Dc937d7a"
│   ├── DeliveryDate: "24-7-2020"
│   ├── DeliveryPrice: "100"
│   ├── ExecutionDate: "25-7-2020"
│   ├── ExecutionPrice: "125"
│   ├── MainContractor: "0xebA00DEb7bCe7A1F24A97E7620d8948408EC8AA"
│   ├── Manufacturer: "0xa5A2ac899e51aE106509Ef97DdF6236BF6bde99"
│   ├── Sub-Contractor: "0x64eb7a27590989769179342f0F7dD1845f84F711"
│   ├── VerificationDate: "25-7-2020"
│   └── VerificationPrice: "150"
├── 0NT4cUK-s-r2yx3R_Cp7X_tp
├── 2CIU2hczPFzhJ426T3ydzS
└── 3p-s-I981az88vSgPRCT9gZt
```

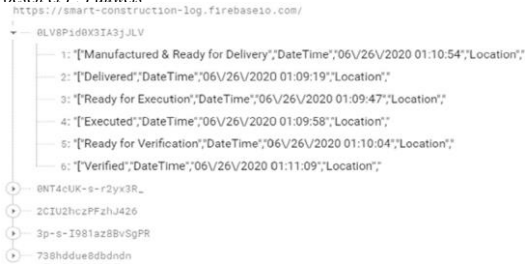
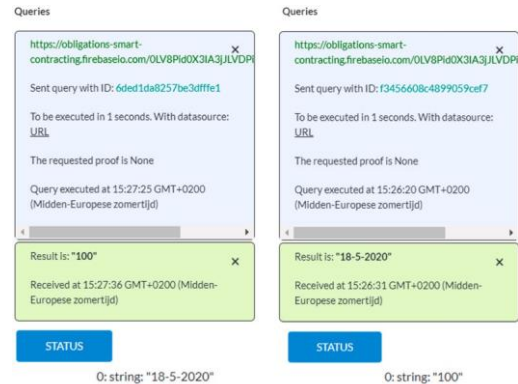


Fig. 10. Journal d'activité de Firebase.

Fig. 11. Requête Oracle dans un contrat intelligent.



Par conséquent, la migration des données vers l'environnement Remix à l'aide des applications développées a été démontrée avec succès. Une optimisation plus poussée de l'application PAT développée peut accroître les résultats positifs observés. Afin d'identifier les aspects susceptibles d'être optimisés, les limitations potentielles, l'applicabilité de l'application dans la pratique ainsi que la validité des résultats obtenus, une vérification supplémentaire dans la pratique doit être effectuée. Ceci peut être fait en étendant l'utilisation de l'application PAT tout au long des projets de construction.

#### 4.3.4. Le grand livre distribué Ethereum

La génération et l'importation des paramètres requis pour l'exécution du contrat intelligent sont démontrées avec succès dans l'environnement Remix. Puisque les paramètres d'obligation (comme prévu) et les paramètres de conformité (comme construit) sont communiqués au contrat intelligent, une transaction peut être exécutée. Pour chaque scénario, les trans- actions appropriées sont exécutées dans l'environnement Remix, ce qui devrait aboutir soit au transfert de jetons entre les parties, soit à un message d'erreur, selon le scénario exécuté. Après l'exécution de tous les scénarios, le feedback du contrat intelligent dans Remix est vérifié pour identifier si les jetons ont été transférés ou conservés. Un exemple de transaction réussie est fourni à la Fig. 12.

L'observation du retour d'information de la transaction a démontré que le contact intelligent a répondu comme prévu dans chaque scénario. Cela se reflète également en vérifiant le solde de jetons pour chaque partie prenante fictive après l'exécution d'une trans- action. Comme l'environnement Remix utilisé est couplé au G erli Testnet, toutes les transactions avec les smart contracts pour chaque scénario sont enregistr  es sur une instance de la blockchain Ethereum.<sup>12</sup> Comme ces transactions sont enregistr  es sur une blockchain, l'utilisation d'Etherscan nous permet d'examiner le journal des transactions et d'inspecter les trans- actions, comme le montre la figure 13.

Bien que la semi-automatisation soit r  alis  e, plusieurs autres composants

```

"from": "0x4a52959d833Dcc461c2408A277d8318b60007496",
"topic": "0x26eb4a415baf730c62c6011b03653f5b8960baf7ad391bd18725e6caa4bfa4c9",
"event": "Payment",
"args": {
  "0": "Payment sent",
  "1": "0x813620c3b12264FF46D88a3F9F4911F2Dc937d7a",
  "2": "0x64eb7a27590989769179342f0f7dD1845f84F711",
  "3": "200",
  "message": "Payment sent",
  "from": "0x813620c3b12264FF46D88a3F9F4911F2Dc937d7a",
  "to": "0x64eb7a27590989769179342f0f7dD1845f84F711",
  "amount": "200",
  "length": 4
}
}

"from": "0x4a52959d833Dcc461c2408A277d8318b60007496",
"topic": "0x953dec42c76a036f9a102dc78d7144cfa7a2c7ef58220ef12da6c75fa2fcfac0",
"event": "Success",
"args": {
  "0": "Element executed",
  "1": "3P$1981AZ8BV5GPRCT9GZT",
  "2": "6",
  "3": "1593046344",
  "4": "0xeb400Eb7bCe7A1Ff24A97E7620d8948408EC8AA",
  "message": "Element executed",
  "GUID": "3P$1981AZ8BV5GPRCT9GZT",
  "locationData": "6",
  "timeStamp": "1593046344",
  "sender": "0xeb400Eb7bCe7A1Ff24A97E7620d8948408EC8AA",
  "length": 5
}
}

```

Fig. 12. Exécution d'une transaction réussie dans remix.

et les actions pour déclencher l'exécution des contrats intelligents sont identifiés comme pouvant être semi-automatisés à l'avenir. Pendant l'exécution du test, plusieurs valeurs d'entrée sont fournies manuellement dans l'environnement Ethereum Remix pour augmenter la flexibilité. Ces interactions peuvent être partiellement automatisées en les programmant dans le futur avec le Réveil Ethereum. L'application d'un modèle de réseau basé sur un consortium et orienté vers les autorisations, avec un algorithme de consensus PoA, s'avère être la plus adaptée aux collaborations dans le domaine de l'environnement bâti. Au lieu d'utiliser une blockchain à autorisation, les contrats intelligents sont déployés sur le réseau d'essai Goerli, qui est un réseau ouvert sans autorisation. Les résultats obtenus lors des tests sur le réseau de test Goerli ne devraient pas changer lorsqu'ils seront testés sur le réseau blockchain personnalisé préféré.

#### 4.3.5. Webapp pour le tableau de bord

Bien que les résultats de l'exécution des contrats intelligents pour les contrats individuels puissent être examinés sur Etherscan, l'interface et le flux de travail pour le faire sont perçus comme peu conviviaux pour les utilisateurs. Pour fournir aux parties prenantes potentielles un aperçu compréhensible de tous les résultats des contrats intelligents, un tableau de bord est préférable. Sur un tel tableau de bord, un journal des états des actifs et des transactions de jetons doit être affiché. Pour permettre la simulation des fonctionnalités du tableau de bord à l'avenir, une WebApp de tableau de bord est développée et déployée sur un domaine en ligne. Comme le tableau de bord développé dépend de l'importation manuelle de fichiers JSON, ces fichiers sont exportés de Firebase pour chaque scénario. Ensuite, ces fichiers sont importés dans l'interface du tableau de bord, après quoi les informations présentées sur le tableau de bord sont comparées à l'historique des transactions sur la blockchain. Les tests exécutés avec l'environnement du tableau de bord indiquent que ce dernier peut gérer aussi bien les transactions réussies que celles qui échouent. Un exemple de tableau de bord rempli après l'exécution du premier scénario est présenté à la figure 14. Les optimisations peuvent porter sur (1) l'établissement d'un lien direct avec les bases de données Firebase, (2) l'inclusion de graphiques et de visualisations supplémentaires requis par la pratique, (3) le développement d'environnements de projets multiples, (4) des instances de tableau de bord spécifiques aux parties prenantes et (5) un lien direct avec les données de la blockchain.

#### 4.3.6. Réflexion

Après l'exécution de tous les tests, les résultats sont validés par rapport à chacune des exigences énoncées. Un aperçu des résultats de cette validation est présenté ci-après.

- 1 La migration réussie des données vers et depuis les contrats intelligents a été démontrée par la transaction d'obligations/états d'actifs dans l'environnement Remix et par la génération d'un aperçu dans le tableau de bord WebApp respectivement.
- 2 Les fonctionnalités et la résilience des applications développées ont été démontrées avec succès dans de multiples scénarios élaborés en collaboration avec un partenaire industriel.

Goerli Testnet Network

Contract 0x62237076519c70133ac434Ab76D362F5BBc997B8

Contract Overview

Balance: 0.00375 Ether

More Info

My Name Tag: Not Available

Contract Creator: 0x70e5d2c6d8eefdb7b6... at txn 0xf94bb569b2b7053f3eb...

Transactions Contract Events

12 Latest 11 from a total of 11 transactions

Txn Hash	Method	Block	Age	From	To	Value	Txn Fee
0x8615dbdef8a377ab39...	0x0782e90	2932704	679 days 14 hrs ago	0x813620c3b12264ff46d...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.000003771036
0xd9e420a77078287de9...	0xf0d8d43c	2932701	679 days 14 hrs ago	0xeba00deb7bce7a1ff24...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.00009711096
0x225a4b0074b07a6885...	0x42d781e4	2932698	679 days 14 hrs ago	0xeba00deb7bce7a1ff24...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.00018230156
0x6c327d6f307d5eb0e9...	0x6c58b1e4	2932689	679 days 14 hrs ago	0x64eb7a275909897691...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.00009105684
0xb24c4ad0a6c3c7ac58...	0x876d421b	2932676	679 days 14 hrs ago	0x64eb7a275909897691...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.00018238274
0x4636bcea515d68c481...	0x53034307	2932665	679 days 14 hrs ago	0xa5a2ac899e51ae1065...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.00013410444
0x462ddc224acada6a2d...	0x911537fe	2929987	680 days 1 hr ago	0x813620c3b12264ff46d...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.000125412
0x4508ec4cbabe563e7d...	0xa899a43	2929987	680 days 1 hr ago	0x813620c3b12264ff46d...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.000125456
0x97aa99e63caba0a9d8...	0x8307b947	2929985	680 days 1 hr ago	0x813620c3b12264ff46d...	IN 0x62237076519c70133a...	0 Ether	0.000125324
0xe392f0a0864e33132c...	0xac84ca14	2929941	680 days 1 hr ago	0x813620c3b12264ff46d...	IN 0x62237076519c70133a...	0.00375 Ether	0.000126774
0xf94bb569b2b7053f3eb...	0x03080640	2929393	680 days 3 hrs ago	0x70e5d2c6d8eefdb7b6...	IN Contract Creation	0 Ether	0.002274809

[Download CSV Export]

Fig. 13. Journal des transactions du contrat intelligent sur la blockchain d'Ethereum.



Task Log				
THE FOLLOWING TABLE SHOWS THE COMPLETE LOG OF TASKS.				
ID	Status	DateTime	Location	
0LV8Pid0X3IA3JLVDPidY	Manufactured & Ready for Delivery	06/26/2020 01:10:54		
0LV8Pid0X3IA3JLVDPidY	Delivered	06/26/2020 01:09:19		
0LV8Pid0X3IA3JLVDPidY	Ready for Execution	06/26/2020 01:09:47		
0LV8Pid0X3IA3JLVDPidY	Executed	06/26/2020 01:09:58		
0LV8Pid0X3IA3JLVDPidY	Ready for Verification	06/26/2020 01:10:04		
0LV8Pid0X3IA3JLVDPidY	Verified	06/26/2020 01:11:09		

Wallet Logs				
THE FOLLOWING TABLE SHOWS THE WALLET LOGS.				
ID	Transfer From	Transfer To	Amount	Transfer Status
0LV8Pid...	0x813620c3...	0xebA00DEb...	100	Delivered
0LV8Pid...	0x813620c3...	0xebA00DEb...	125	Executed
0LV8Pid...	0x813620c3...	0xebA00DEb...	150	Verified

**Fig. 14.** Instantané de la page de la webapp du tableau de bord remplie.

- Un journal immuable des transactions et des paiements a été enregistré sur le testnet Ethereum de Goerli à l'aide des applications développées.
- Les jetons ont été distribués aux bons intervenants dans chaque scénario, avec une intervention humaine limitée.

entre les parties prenantes. Nous reconnaissons bien sûr qu'il existe de nombreux autres facteurs non technologiques qui ont un impact sur la confiance et la transparence. Cependant, nous pensons que l'infrastructure développée contribue à la réduction des risques et donc des conflits entre les parties prenantes.

Ces tests positifs montrent que le cadre proposé est efficace et prometteur. Néanmoins, notre validation et nos résultats sont actuellement à petite échelle, et d'autres tests sont nécessaires à plus grande échelle et dans un contexte commercial pour évaluer davantage la faisabilité de notre cadre pour suivre les actifs préfabriqués et la conformité avec les technologies utilisées. Des mises en garde importantes pour ces futurs tests sont incluses dans la conclusion et la discussion ci-dessous.

## 5. Conclusion et discussion

Sur la base du cadre construit, des prototypes développés et des tests exécutés, une semi-automatisation de la vérification de la conformité de la planification, des paiements et des notifications est réalisée. L'application PAT développée fournit des états physiques tandis que les paramètres contractuels sont fournis au moyen d'un modèle BIM hypothétique géré conjointement. Les contrats intelligents permettent une comparaison semi-automatique de l'état "tel que planifié" et "tel que construit" et transfèrent des jetons en fonction des résultats. En outre, les notifications relatives à la conformité ou à la non-conformité sont communiquées avec succès aux parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement dans l'environnement Remix et sur le tableau de bord WebApp. Un journal de toutes les interactions du contrat intelligent est conservé dans un registre distribué. Ainsi, (1) le suivi semi-automatique de la conformité, (2) les paiements ultérieurs (jetons) et (3) un journal immuable/transparence sont réalisés et testés dans des cas d'utilisation pratiques.

Bien qu'il y ait encore de la place pour l'optimisation, le déploiement conjoint des techniques de suivi des actifs tout au long de la chaîne d'approvisionnement est mieux compris. S'il est développé de manière appropriée, le déploiement d'une version optimisée du concept proposé peut accroître la transparence. Une transparence accrue pourrait progressivement permettre le développement de la confiance

Notre proposition et nos résultats offrent une combinaison de composants. Pour chacun de ces composants, quelques conclusions peuvent être tirées.

#### 5.1.1. Cadre de travail

Comme les applications développées dépendent du stockage des données sur des serveurs centralisés, cela va à l'encontre de la nature distribuée de la DLT. Le développement de DApps, qui fonctionnent sur la blockchain elle-même, est essentiel pour tirer pleinement parti des avantages de la DLT. Bien que nous espérons que le développement et l'application de DApps dans l'environnement bâti deviendront possibles à l'avenir, l'utilisation des applications centralisées actuellement disponibles est nécessaire pour réaliser des avancées pratiques.

#### 5.1.2. Suivi des actifs

Comme nous nous concentrons sur le PAT pour les éléments préfabriqués, les technologies géospatiales (codes QR) sont considérées comme les plus appropriées car elles permettent un suivi sur et hors site. L'application des technologies géospatiales pour le suivi collectif des actifs tout au long de la chaîne d'approvisionnement présente plusieurs avantages par rapport au suivi manuel des actifs. Ces avantages comprennent l'efficacité accrue de la collecte des données, de la communication et du stockage centralisé. Cependant, ces avantages potentiels sont surtout réalisés grâce à l'effort collectif des activités de suivi des actifs par les parties prenantes qui collaborent.

Afin de suivre tous les actifs physiques à l'avenir, les technologies géospatiales doivent être combinées avec des technologies de balayage (par exemple, nuage de points), pour permettre un suivi efficace de l'avancement sur le site. Les technologies de balayage doivent être envisagées principalement pour capturer la progression sur site des éléments de construction plus petits (par exemple, la maçonnerie) et des éléments qui sont fabriqués sur site (béton coulé). Il est donc nécessaire de combiner les deux technologies à l'avenir. Idéalement, le transfert semi-automatique des données des capteurs vers des bases de données distribuées ou le grand livre distribué lui-même doit être réalisé.

#### 5.1.3. Gestion des actifs

Les modèles BIM ne sont pas le seul moyen de stocker les paramètres contractuels requis. Il existe d'autres solutions, comme les bases de données distribuées, les applications Web et les systèmes de planification des ressources d'entreprise (ERP) liés, qui peuvent présenter des avantages considérables par rapport aux modèles BIM. Quoi qu'il en soit, le partage

Les données sensibles (par exemple, les données sur les coûts) pourraient susciter une certaine résistance dans l'industrie en raison de l'exposition des structures de prix entre les parties prenantes. En outre,

la centralisation des paramètres contractuels va à l'encontre de la nature distribuée des DLT. Pour permettre une gestion et un traitement efficaces des paramètres contractuels (planification et coûts) dans l'environnement DLT, il est préférable de stocker ces données dans un système d'information distribué. La distribution de ces données et leur utilisation sur une DLT doivent être étudiées plus avant.

#### 5.1.4. Grand livre distribué

Dans les recherches antérieures, il est souvent suggéré que les registres distribués apportent la transparence et donc la confiance par le biais de l'immutabilité, de la sécurité et de la redistribution du pouvoir. Cette technologie est donc identifiée comme un moyen de réduire les risques et les conflits potentiels entre les parties prenantes de la chaîne d'approvisionnement. En outre, les contrats intelligents sont utilisés pour permettre la semi-automatisation du contrôle de la conformité de la planification et des procédures de paiement. Dans cette recherche, nous nous concentrons sur l'application d'un réseau blockchain basé sur Ethereum, en raison de la technologie des contrats intelligents qui y est associée. Bien que tous les types de réseaux blockchain ne permettent pas l'utilisation de technologies de contrats intelligents, des alternatives moins importantes à la blockchain Ethereum sont disponibles (par exemple Hyperledger).

#### 5.1.5. Contrats intelligents

Les optimisations des contrats intelligents développés peuvent se concentrer sur : (1) l'optimisation des entrées de valeur, (2) la réduction des coûts de transaction et (3) la liaison de la blockchain à une application décentralisée externe (pour définir les paramètres du contrat et suivre les actifs), au lieu d'utiliser diverses applications interreliées. En ce qui concerne le point (1), l'optimisation des entrées de valeur dans les contrats intelligents, des mécanismes tels que le réveil d'Ethereum peuvent être utilisés. L'intervention humaine étant souhaitable pour garantir la validité des données fournies, il convient d'étudier les avantages de l'utilisation d'un tel mécanisme.

En ce qui concerne le point (2), la réduction des coûts de transaction, chaque exécution de contrat intelligent ou transaction sur la blockchain nécessite une puissance de calcul. L'ampleur de la puissance de calcul requise dépend de l'efficacité du code dans un contrat intelligent et entraîne des coûts de transaction. Ces coûts de transaction sont exprimés sur la blockchain Ethereum sous forme de frais de gaz. Le coût d'une unité de gaz est exprimé en GWEI représentant une valeur de 0,000000001 Ethereum.<sup>13</sup> Comme les transactions ont été exécutées sur un réseau de test Ethereum dans cette recherche, ces transactions ne nécessitent actuellement aucun paiement. Cependant, lorsque nos contrats intelligents seront déployés sur le réseau principal, ces coûts de transaction devront être payés. Il est donc important de fournir un aperçu des coûts d'exécution des contrats intelligents et une estimation de ces coûts de transaction dans les projets de construction. Comme les transactions ont été exécutées dans l'environnement de test Ethereum, les coûts de transaction pour l'exécution du contrat ont été enregistrés dans un journal en ligne.<sup>14</sup> En utilisant cet enregistrement et en considérant le prix d'ex- change de 1 ETH qui est de 2699,08 euros le 02/05/2022,<sup>15</sup> coûts de transaction peuvent être déterminés. Pour la création du contrat, ces coûts sont de 6,14 euros et le coût moyen de transaction par interaction avec le contrat intelligent est de 0,30 euro. Étant donné que le contrat intelligent est utilisé dans tous les États par lesquels passent les biens physiques concernés, les coûts de transaction totaux, y compris la création du contrat, sont de 9,16 euros. Si l'on considère qu'un grand projet de construction contient au moins un millier de biens préfabriqués et si l'on suppose que le flux de travail proposé se limite à ces biens, les coûts de transaction totaux pour un projet sont estimés à 9160 euros. En raison du prix élevé de ces grands biens, les coûts de transaction ne semblent pas disproportionnés. Si et

quand l'utilisation des contrats intelligents n'est pas limitée aux actifs préfabriqués mais également utilisée pour des composants plus petits, le nombre d'actifs physiques et donc de contrats intelligents augmentera.

<sup>13</sup> <https://ethereum.org/en/developers/docs/gas/>

<sup>14</sup> <https://goerli.etherscan.io/address/0x62237076519c70133ac434ab76d362f5bbc997b8>

<sup>15</sup> <https://www.coinbase.com/price/ethereum>

W. van Groesen et P. Pauwels. de manière significative (9,16 euros par contrat). En outre, si le nombre de transactions augmente (par exemple, en raison de défauts), ces coûts devraient augmenter (0,30 euro par transaction). Dans ces cas, il est facile d'imaginer que l'importance des coûts de transaction doit être abordée pour augmenter la faisabilité du concept. Cela peut être fait en partie en augmentant l'efficacité des contrats intelligents et en partie en fusionnant ou en regroupant plusieurs biens physiques dans un seul contrat intelligent.

En ce qui concerne le point (3), la distribution ne peut être réalisée que si l'ensemble de l'infrastructure est décentralisée, les efforts de recherche futurs doivent se concentrer sur le développement d'applications décentralisées (DApps). Comme ces types d'applications fonctionnent essentiellement sur un réseau blockchain, le stockage de données distribué est également réalisé. Cela profite au concept proposé et entraîne une plus grande distribution, ce qui répond au point (3) : relier la blockchain à une application décentralisée externe. La mise en œuvre d'un mécanisme de contrôle (qui ne dépend pas de l'administrateur), est nécessaire pour garantir la validité des données au cours des étapes intermédiaires dans les concepts futurs. Il reste cependant à savoir si la décentralisation est réalisable dans la pratique, car la décentralisation du pouvoir dans l'industrie est difficile à réaliser. Pour tirer pleinement parti de la nature distribuée des réseaux blockchain, une répartition égale du pouvoir au sein des réseaux blockchain doit être établie. En outre, une répartition égale du pouvoir entre les parties prenantes collaborant en dehors du réseau blockchain et la décentralisation de toutes les applications numériques utilisées sont également nécessaires. Bien que l'utilisation de la blockchain et des contrats intelligents puisse contribuer à une meilleure répartition du pouvoir, un grand nombre de changements culturels et d'autres développements sont nécessaires.

#### 5.1.6. Tableau de bord

Le tableau de bord WebApp est développé pour donner un aperçu des données PAT, des paramètres du contrat et des résultats du calcul du contrat intelligent (par exemple, le solde des jetons des parties prenantes). Bien qu'idéalement un tel tableau de bord soit directement lié aux données de la blockchain, l'établissement d'un tel lien sur un réseau de test de la blockchain n'a pas été possible. Si les smart contracts développés sont déployés sur une instance de réseau principal personnalisée, plusieurs services de tableau de bord peuvent être utilisés. Cependant, les fonctionnalités de ces services sont limitées en raison de problèmes techniques non résolus. Le déploiement des contrats intelligents développés sur le réseau principal n'est pas réalisé dans le cadre de ce travail.

#### 5.2. Contribution

Les recherches antérieures sur la DLT, les contrats intelligents et les codes QR pour le suivi des actifs et de la conformité se concentrent principalement sur les activités de construction sur site. Les recherches présentées permettent également de mieux comprendre l'application combinée de ces concepts dans l'ensemble des chaînes d'approvisionnement de la construction. Les travaux précédents ont contribué de manière significative au développement de cadres et de théories nécessaires à l'application de ces technologies dans la pratique. Cependant, l'application de ces technologies individuelles et combinées dans des cas d'utilisation réels de l'industrie est identifiée comme manquante. Le cadre développé et les prototypes qui sont présentés et testés dans cet article, nous donnent un meilleur aperçu de l'application réelle d'un tel concept dans l'industrie. En outre, le développement d'un journal de construction immuable pour augmenter la transparence et la confiance a été largement couvert dans la littérature. Le concept proposé et testé comprend un prototype d'un tel journal de construction, qui est testé dans des scénarios industriels.

Dans l'ensemble, ces informations contribuent à l'optimisation et à la semi-automatisation de : (1) le suivi des actifs préfabriqués, (2) le contrôle de conformité et (3) les transferts de jetons (paiements). Les prototypes développés permettent la combinaison de diverses

technologies dans un contexte de chaînes d'approvisionnement, ce qui peut être considéré comme un concept de base essentiel pour le développement de collaborations durables. Un tel concept peut évoluer vers un système distribué opérationnel et intégré. Ce système permet aux acteurs de l'industrie de capitaliser conjointement sur les avantages qu'offrent les grands livres : (1) distribués, (2) immuables, (3) sécurisés et (4) transparents. Bien que ses effets sur les collaborations dans le domaine de l'environnement bâti doivent être vérifiés de manière empirique, le concept développé fournit une base de travail pour la mise en place d'un système de gestion de l'environnement.

base pour accroître la confiance et réduire les conflits.

## Déclaration d'intérêts concurrents

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts financiers concurrents connus ou de relations personnelles qui auraient pu sembler influencer le travail rapporté dans cet article.

## Remerciements

Les auteurs de cet article tiennent à exprimer leurs sincères remerciements à la société Royal VolkerWessels aux Pays-Bas pour sa participation au groupe d'experts, la fourniture de données pratiques pour construire les cas d'utilisation requis et la vérification des résultats de l'exécution des cas de test.

## Références

- [1] S. Nanayakkara, S. Perera, S. Senaratne, Stakeholders' perspective on blockchain and smart contracts solutions for construction supply chains, in : Proceedings of the CIB World Building Congress 2019 : Constructing Smart Cities, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, Chine, 2019, pp. 1-11, <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.8868386.v1>.
- [2] A. Ashworth, S. Perera, Procédures contractuelles dans l'industrie de la construction, Taylor & Francis, Andover, Angleterre Royaume-Uni, 2018, <https://doi.org/10.1201/9781315529059>.
- [3] R. Vrijhoef, L. Koskela, The four roles of supply chain management in construction, Eur. J. Purchase. Supply Manage. 6 (3-4) (2000) 169-178, [https://doi.org/10.1016/S0969-7012\(00\)00013-7](https://doi.org/10.1016/S0969-7012(00)00013-7).
- [4] M.N.A. Azman, N. Dzulkalnine, Z. Abd Hamid, K.W. Beng, Payment issue in Malaysian construction industry : contractors' perspective, J. Technol. 70 (1) (2014) 57-63, <https://doi.org/10.11113/jt.v70.2804>.
- [5] P. Behera, R.P. Mohanty, A. Prakash, Understanding construction supply chain management, Prod. Plan. Control 26 (16) (2015) 1332-1350, <https://doi.org/10.1080/09537287.2015.1045953>.
- [6] J. Mason, Intelligent contracts and the construction industry, J. Legal Affair. Dispute Resolut. Eng. Constr. 9 (3) (2017) 04517012, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000233](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000233).
- [7] A. Shojaei, I. Flood, H. Izadi Moud, M. Hatami, X. Zhang, Une mise en œuvre de contrats intelligents en intégrant bim et blockchain, in : Proceedings of the Future Technologies Conference, 2019, p. 519-527, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-32523-7-36>.
- [8] A. Heiskanen, The technology of trust : how the internet of things and blockchain could usher in a new era of construction productivity, Constr. Res. Innovat. 8 (2) (2017) 66-70, <https://doi.org/10.1080/20450249.2017.1337349>.
- [9] S. El-Omari, O. Moselhi, Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work, Automat. Constr. 18 (1) (2008) 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.006>.
- [10] J. Wang, P. Wu, X. Wang, W. Shou, The outlook of blockchain technology for construction engineering management, Front. Eng. Manage. 4 (1) (2017) 67-75, <https://doi.org/10.15302/J-FEM-2017006>.
- [11] J. Li, M. Kassem, A. Ciribini, M. Bolpagni, A proposed approach integrating dlt, bim, iot and smart contracts : demonstration using a simulated installation task, in : International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC), 2019, pp. 275-282, <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.275>.
- [12] M. Kopsida, I. Brilakis, P.A. Vela, A review of automated construction progress monitoring and inspection methods, in : Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference (2015), 2015, pp. 421-431, <https://ite.scix.net/paper/w78-2015-paper-044>.
- [13] B. Hubbard, H. Wang, M. Leasure, T. Ropp, T. Lofton, S. Hubbard, S. Lin, Feasibility study of UAV use for RFID material tracking on construction sites, in : 51st ASC Annual international conference proceedings, 2015, pp. 669-676.
- [14] A. Lanko, N. Vatin, A. Kaklauskas, Application of rfid combined with blockchain technology in logistics of construction materials, in : MATEC Web Conferences Vol. 170, 2018, p. 03032, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817003032>.
- [15] A. Guillen, A. Crespo, J. Go'mez, V. Gonz'alez-Prida, K. Koback, S. Shariff, Building information modeling as asset management tool, IFAC-PapersOnline 49 (28) (2016) 191-196, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.033>, in 3rd IFA Workshop on Advanced Maintenance Engineering Services and Technology AMEST.
- [16] M. Grieves, Digital twin : manufacturing excellence through virtual factory replication, White Paper 1 (2014) 1-7, <https://www.researchgate.net/publication/275211047>.
- [17] J. Li, D. Greenwood, M. Kassem, Blockchain dans l'environnement bâti et l'industrie de la construction : un examen systématique, des modèles conceptuels et des cas d'utilisation pratiques, Automat. Constr. 102 (2019) 288-307, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.005>.
- [18] Turk F.Z., R. Kline, Potentiels de la technologie blockchain pour la gestion de la construction, in : Creative Construction Conference 2017, Primosten, Croatie, 2017, pp. 638-645, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.052>. CC.
- [19] N.O. Nawari, S. Ravindran, Blockchain et l'environnement bâti : potentiels et limites, J. Build. Eng. 25 (2019) 100832, <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2019.100832>.
- [20] Z. Wang, T. Wang, H. Hu, J. Gong, X. Ren, Q. Xiao, Blockchain-based framework for improving supply chain traceability and information sharing in precast construction, Automat. Constr. 111 (2020) 103063, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103063>.
- [21] H. Hamledari, M. Fischer, Construction payment automation using blockchain-enabled smart contracts and robotic reality capture technologies, Automat. Constr. 132 (2021) 103926, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103926>.
- [22] H.R. Hasan, K. Salah, Proof of delivery of digital assets using blockchain and smart contracts, IEEE Access 6 (2018) 65439-65448, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2876971>.
- [23] A.A. Hijazi, S. Perera, R.N. Calheiros, A. Alashwal, Rationale for the integration of bim and blockchain for the construction supply chain data delivery : a systematic literature review and validation through focus group, J. Constr. Eng. Manage. 147 (10) (2021) 03121005, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002142](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002142).
- [24] I. Lokshina, M. Gregu's, W.L. Thomas, Application of integrated building information modeling, iot and blockchain technologies in system design of a smart building, Proc. Comput. Sci. 160 (2019) 497-502, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.058>, la 10e conférence internationale sur les systèmes ubiquitaires émergents et les réseaux pervasifs (EUSPN-2019).
- [25] I. Belle, L'industrie de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction et la technologie blockchain, in : G. Ji, Z. Tong (Eds.), Digital Culture - Proceedings of 2017 National Conference on Digital Technologies in Architectural Education and DADA 2017 International Conference on Digital Architecture, China, Architecture Industry Publishers, Nanjing : Chine, 2017, p. 279-284, <https://www.researchgate.net/publication/322468019>.
- [26] ISO, Gestion des actifs - Vue d'ensemble, principes et terminologie, norme, Organisation internationale de normalisation, Genève Suisse, 2014 <https://www.iso.org/standard/55088.html>.
- [27] N. Anthony, J. Hastings, Physical Asset Management : Avec une introduction à la série de normes ISO 55000, Springer : Cham, Suisse, 2015, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62836-9>.
- [28] Z. Ma, L. Zhou, W. Sheng, Analyse de la nouvelle norme de gestion des actifs iso 55000 et pas 55, in : 2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED), 2014, pp. 1668-1674, <https://doi.org/10.1109/CICED.2014.6991990>.
- [29] H. Braaksma, Gestion intelligente des actifs dans le secteur de la construction : A Holistic Research into Utilising the Potential of Sensor Technology, mémoire de maîtrise, Université de technologie de Delft, Delft, 2016 <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:af074ec5-b8c7-4a30-9f16-e3ac7ff5e900>.
- [30] M. Sakikhales, S. Stravarovdis, Using agile project management and bim for improved building performance, in : Building Information Modelling, Building Performance, Design and Smart Construction, Springer : Cham, Suisse, 2017, pp. 65-78, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50346-2-5>.
- [31] Q. Lu, X. Xie, J. Heaton, A.K. Parlikad, J. Schooling, From bim towards digital twin : Strategy and future development for smart asset management, in : International Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Springer : Cham, Suisse, 2020, pp. 392-404, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1-30>.
- [32] C. Boje, A. Guerriero, S. Kubicki, Y. Rezgui, Towards a semantic construction digital twin : directions for future research, Automat. Constr. 114 (2020) 103-179, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179>.
- [33] R. Zeibak-Shini, R. Sacks, L. Ma, S. Filin, Towards generation of as-damaged bim models using laser-scanning and as-built bim : first estimate of as-damaged locations of reinforced concrete frame members in masonry infill structures, Adv. Eng. Informat. 30 (3) (2016) 312-326, <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.001>.
- [34] Z. Pucko, D. Vincek, A. S'rukelj, N. S'uman, Application de l'information sur les bâtiments 6d. model (6d bim) for business-storage building in slovenia, in : IOP Conference Series : Materials Science and Engineering Vol. 245, 2017, p. 062028, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/6/062028>.
- [35] Y. Fang, Y.K. Cho, S. Zhang, E. Perez, Case study of bim and cloud - enabled real-time rfid indoor localization for construction management applications, J. Constr. Eng. Manage. 142 (7) (2016) 05016003, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001125).
- [36] Y. Turkan, F. Bosche, C.T. Haas, R. Haas, Automated progress tracking using 4d schedule and 3d sensing technologies, Automat. Constr. 22 (2012) 414-421, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.10.003>.
- [37] J. Mason, Bim fork : les contrats intelligents dans la construction ont-ils plus de chances de prospérer avec ou sans bim ? J. Legal Affair. Dispute Resolut. Eng. Constr. 11 (4) (2019) 02519002, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)LA.1943-4170.0000316](https://doi.org/10.1061/(ASCE)LA.1943-4170.0000316).
- [38] J. Gong, C.H. Caldas, Data processing for real-time construction site spatial modeling, Automat. Constr. 17 (5) (2008) 526-535, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2007.09.002>.
- [39] T. Cheng, M. Venugopal, J. Teizer, P. Vela, Performance evaluation of ultra wideband technology for construction resource location tracking in harsh environments, Automat. Constr. 20 (8) (2011) 1173-1184, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.05.001>.
- [40] W. Lu, G.Q. Huang, H. Li, Scénarios d'application de la technologie rfid dans la gestion des projets de construction, Automat. Constr. 20 (2) (2011) 101-106, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.007>.
- [41] S. Yuvaraj, M. Sangeetha, Smart supply chain management using internet of things (iot) and low power wireless communication systems, in : 2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking



- (WiSPNET), 2016, p. 555-558, <https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2016.7566196>.
- [42] C. Scardovi, *Restructuration et innovation dans le secteur bancaire*, Springer, Cham, Suisse, 2016, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40204-8>.
- [43] J. Li, D. Greenwood, M. Kassem, *Blockchain dans le secteur de la construction : un cadre de systèmes socio-techniques pour l'industrie de la construction*, in : *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering*, Springer International Publishing, Cham, Suisse, 2019, pp. 51-57, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6-7>.
- [44] S. Nakamoto, *Bitcoin : A peer-to-peer electronic cash system*, *Decentralized Business Review*, Séoul, 2019. <https://www.debr.io/article/21260-bitcoin-a-peer-to-peer-electronic-cash-system>.
- [45] N. Szabo, *Formalisation et sécurisation des relations sur les réseaux publics 2*, *First Monday*, Chicago, 2012, <https://doi.org/10.5210/fm.v2i9.548>.
- [46] G. Peters, E. Panayi, A. Chapelle, *Trends in cryptocurrencies and blockchain technologies : a monetary theory and regulation perspective*, *J. Finan. Perspect.* 3 (3) (2021) <https://ssrn.com/abstract=3084011>.
- [47] R. Herian, *Smart contracts : a remedial analysis*, *Informat. Commun. Technol. Law* 30 (1) (2021) 17-34, <https://doi.org/10.1080/13600834.2020.1807134>.
- [48] H. Luo, M. Das, J. Wang, J. Cheng, *Construction payment automation through smart contract-based blockchain framework*, in : *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2019 International Association for Automation and Robotics in Construction I.A.A. R.C.*, 2019, pp. 1254-1260, <https://doi.org/10.22260/isarc2019/0168>.
- [49] A.M. Antonopoulos, G. Wood, *Mastering Ethereum*, O'Reilly Media, Inc, Sebastopol, CA, USA, 2018 <https://www.oreilly.com/library/view/mastering-ethereum/9781491971932>.
- [50] S. Ferretti, G. D'Angelo, *On the ethereum blockchain structure : a complex networks theory perspective*, *Concurrency Computat. Practice Experience* 32 (12) (2020) 1-12, <https://doi.org/10.1002/cpe.5493>.
- [51] G. Wood, *Ethereum : a secure decentralised generalised transaction ledger*, *Ethereum Project Yellow Paper* 151 (2014) 1-32, <http://gavwood.com/Paper.pdf>.
- [52] A. Baliga, *Understanding Blockchain Consensus Model 4*, *Persistent Ltd, Santa Clara*, 2017 <https://www.persistent.com/wp-content/uploads/2017/04/WP-Understanding-Blockchain-Consensus-Models.pdf>.
- [53] M. Crosby, P. Pattanayak, S. Verma, V. Kalyanaraman, *Blockchain technology : beyond bitcoin*, *Appl. Innovat.* 2 (6-10) (2016) 71, <https://j2-capital.com/wp-content/uploads/2017/11/AIR-2016-Blockchain.pdf>.
- [54] D. Kifokeris, C. Koch, *A conceptual digital business model for construction logistics consultants, featuring a sociomaterial blockchain solution for integrated economic, material and information flows*, *J. Informat. Technol. Constr.* 25 (2020) 500-521, <https://doi.org/10.36680/JITCON.2020.029>.
- [55] G. Hileman, M. Rauchs, *2017 global blockchain benchmarking study*, *SSRN Electr. J.* 1 (2018) 1-115, <https://doi.org/10.2139/ssrn.3040224>.
- [56] V. Acharya, A.E. Yerrapati, N. Prakash, *Oracle Blockchain Quick Start Guide : A Practical Approach to Implementing Blockchain in your Enterprise*, Packt Publishing Ltd, Birmingham, Angleterre, UK, 2019 <https://subscription.packtpub.com/product/big-data-and-business-intelligence/9781789804164>.
- [57] D. Lee, S.H. Lee, N. Masoud, M. Krishnan, V.C. Li, *Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects*, *Automat. Constr.* 127 (2021) 103688, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103688>.
- [58] S. Huang, G. Wang, Y. Yan, X. Fang, *Blockchain-based data management for digital twin of product*, *J. Manufact. Syst.* 54 (2020) 361-371, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.01.009>.
- [59] X. Ye, M. Ko'nig, *Framework for automated billing in the construction industry using bim and smart contracts*, in : *International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 2021, pp. 824-838, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8-57>.
- [60] H. Hamledari, M. Fischer, *The application of blockchain-based crypto assets for integrating the physical and financial supply chains in the construction & engineering industry*, *Automat. Constr.* 127 (2021) 103711, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103711>.
- [61] J. Li, M. Kassem, R. Watson, *A Blockchain and smart contract-based framework to increase traceability of built assets*, in : *Proc. 37th CIB W78 Information Technology for Construction Conference (CIB W78)*, Sao Paulo, Brésil, 2020, pp. 347-362, <https://doi.org/10.46421/2706-6568.37>.
- [62] R. Wieringa, *Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering*, Springer : Cham, Suisse, 2014, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-43839-8>.
- [63] K. Peffers, T. Tuunanen, M.A. Rothenberger, S. Chatterjee, *A design science research methodology for information systems research*, *JMIS* 24 (3) (2007) 45-77, <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>.