

Assurance décennale, réemploi et blockchain : cadre R5BC fondé sur la durée de vie résiduelle et la conformité technique

Chaire R5BC Team

6 mars 2026

1 Assurance décennale, réemploi et blockchain

Le réemploi de matériaux et de composants dans un ouvrage neuf (bâtiment B) s’inscrit dans la dynamique plus large de l’économie circulaire appliquée au secteur du bâtiment, laquelle vise à prolonger la durée de vie des produits, à réduire la consommation de ressources vierges et à limiter les déchets de construction [7, 16, 12]. Dans le secteur de la construction, fortement contributeur aux consommations de matières premières et aux émissions de gaz à effet de serre [18], cette stratégie soulève toutefois un verrou majeur d’acceptabilité : la *sécurisation juridique et assurantielle* dans le cadre de la responsabilité décennale. En pratique, l’assurance décennale vise à couvrir, sur une durée de dix ans à compter de la réception, les dommages compromettant la solidité de l’ouvrage ou le rendant impropre à sa destination. Or, l’introduction de composants issus du réemploi (poutres, menuiseries, éléments de façade, équipements techniques, etc.) peut être perçue comme une augmentation d’incertitude en raison (i) d’un historique d’usage parfois incomplet, (ii) d’une variabilité des performances résiduelles, et (iii) d’une traçabilité documentaire hétérogène, difficultés déjà soulignées dans la littérature sur la construction circulaire et le réemploi [2, 6, 5, 3].

Dans ce contexte, le modèle R5BC (Return–Repair–Reuse–Recycle based on Blockchain) propose un cadre intégré permettant de *réduire l’incertitude assurantielle* via deux notions centrales :

- **la conformité technique vérifiée** (diagnostic, essais, classification d’usage) ;
- **la durée de vie résiduelle** (Residual Useful Life, notée *RUL*) estimée et documentée, permettant d’objectiver la capacité du composant à remplir sa fonction pendant l’horizon de garantie.

1.1 Principe d’évaluation par durée de vie résiduelle (RUL)

La *durée de vie résiduelle* (*RUL*) vise à quantifier la partie de la capacité de service d’un composant qui reste disponible au moment de sa réintégration dans le bâtiment B. Cette logique s’inscrit dans une approche plus large de gestion des flux en boucle fermée, où la récupération et la réintégration des composants sont au cœur des chaînes logistiques circulaires [8, 9]. Dans une formulation simple, on définit :

$$RUL = L_{\text{tot}} - L_{\text{used}}, \quad (1)$$

où L_{tot} représente une durée de vie de référence (typique ou normative selon la famille de composants) et L_{used} la durée déjà consommée lors de l’usage antérieur.

Dans le cadre assurantiel, une condition *nécessaire* (non suffisante) pour limiter l’exposition au risque décennal peut s’exprimer sous la forme :

$$RUL \geq 10 \text{ ans}, \quad (2)$$

en cohérence avec l’horizon temporel de la garantie décennale. Pour les composants critiques, la condition (2) peut être renforcée par une marge de sécurité Δ :

$$\text{RUL} \geq 10 + \Delta, \quad (3)$$

où Δ dépend notamment de la criticité structurelle, de l’incertitude sur l’historique et du contexte d’exposition (environnement, sollicitations, cycles thermiques, corrosion, humidité, etc.).

1.2 Conformité technique : diagnostic, essais et classification d’usage

La RUL n’est exploitable qu’à condition d’être adossée à une *conformité technique* démontrée. Le processus proposé repose sur :

1. **Identification et inspection** : contrôle visuel, métrique, détection de défauts (corrosion, fissures, déformations, altérations).
2. **Essais et mesures** : essais mécaniques (si nécessaire), contrôles non destructifs, caractérisations spécifiques selon la famille (acier, bois, béton, équipements techniques).
3. **Aptitude à l’usage et classification** : affectation à une classe d’usage (structurel, semi-structurel, non structurel) et définition de conditions de mise en œuvre.
4. **Dossier technique de réemploi** : constitution d’un corpus de preuves (résultats d’essais, rapports, photos, conditions d’installation, restrictions).

Ce dossier matérialise un *niveau de confiance* indispensable à l’assureur pour évaluer le risque associé à l’intégration du composant réemployé. Plus largement, la littérature montre que l’absence de standardisation des procédures d’évaluation et de certification constitue l’un des freins majeurs au passage à l’échelle du réemploi dans la construction [2, 3, ?].

1.3 Référentiel environnemental : INIES, FDES, ACV et RE2020

Au-delà de la conformité technique, le réemploi doit être justifié sur le plan environnemental afin de soutenir la logique *RE2020*. Le cadre R5BC structure une évaluation environnementale fondée sur l’Analyse du Cycle de Vie (ACV), méthode de référence pour l’évaluation environnementale des produits et systèmes [1], en reliant les composants réemployés à un référentiel reconnu :

- **FDES** : Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (lorsqu’une fiche spécifique existe pour un produit/famille) ;
- **INIES** : base nationale de référence des données environnementales et sanitaires mobilisée dans les calculs RE2020.

Lorsque la correspondance exacte n’est pas disponible, une approche pragmatique consiste à rattacher le composant à une FDES générique ou à un proxy (matériau équivalent) *avec justification documentée*. Cette logique est cohérente avec les travaux montrant que le réemploi peut réduire significativement les impacts environnementaux de la construction, à condition de structurer correctement les hypothèses d’ACV et les flux logistiques associés [16, 12, 3].

L’indicateur clé de valorisation est la quantité de carbone évitée associée au réemploi, pouvant être exprimée sous une forme générique :

$$\text{CO}_{2,\text{vit}} = \text{CO}_{2,\text{rf_neuf}} - \text{CO}_{2,\text{remploi}}, \quad (4)$$

où $\text{CO}_{2,\text{rf_neuf}}$ provient des données FDES/INIES (scénario matériau neuf) et $\text{CO}_{2,\text{remploi}}$ intègre les impacts du processus de réemploi (dépose, tri, transport, stockage, remise en état).

1.4 Blockchain R5BC : passeport numérique, smart contracts et preuve d’assurabilité

La contribution principale de la blockchain dans R5BC est de transformer un ensemble de documents hétérogènes en une *preuve traçable et vérifiable*. Cette orientation s’inscrit dans la littérature récente sur les chaînes d’approvisionnement durables, qui identifie la blockchain comme une infrastructure de confiance pour améliorer la transparence, la traçabilité et la coordination inter-acteurs [17, 13]. Dans le secteur de la construction, plusieurs travaux ont également montré l’intérêt de la blockchain pour la gestion de l’information technique, la certification et les contrats intelligents [14, 15, 19, 20]. Chaque composant est ainsi associé à un **passeport numérique matériau** (Digital Material Passport), en cohérence avec les travaux récents sur les *digital product passports*, les *material passports* et les *material banks* dans la construction circulaire [11, 10, 4], contenant :

- l’origine (chantier A), les conditions de dépose et de tri ;
- les diagnostics/essais et la classe d’usage ;
- l’estimation de RUL, ses hypothèses et marges ;
- le rattachement environnemental (FDES/INIES) et l’ACV ;
- l’historique des transferts (logistique inverse) et des réintégrations.

Un **smart contract** orchestre ensuite des règles de validation (technique et environnementale) et peut déclencher :

1. la **validation d’éligibilité au réemploi** (selon critères RUL, conformité, criticité) ;
2. la **tokenisation carbone** (émission de jetons représentant $\text{CO}_{2,\text{vit}}$) ;
3. la **mise à disposition de preuves** pour l’évaluation assurantielle.

L’évaluation du risque assurantiel peut être conceptualisée sous la forme :

$$\mathcal{R} = f(\text{RUL}, \mathcal{C}_{\text{tech}}, \mathcal{K}, \mathcal{U}), \quad (5)$$

où $\mathcal{C}_{\text{tech}}$ désigne un score/grade de conformité technique, \mathcal{K} la criticité (structurel vs non structurel) et \mathcal{U} un terme d’incertitude (qualité de l’historique, dispersion des mesures, conditions d’exposition). L’intérêt opérationnel est de fournir à l’assureur un *paquet de preuves* standardisé, traçable et auditable, réduisant la perception de « technique non courante » et facilitant la contractualisation.

1.5 Intégration des flux : du chantier au contrat d’assurance

La Figure 1 synthétise le mécanisme complet en distinguant explicitement des flux physiques, informationnels, environnementaux et assurantiels, dans une logique de chaîne circulaire où la logistique inverse constitue l’opérateur de mise en œuvre de l’économie circulaire [8, 9].



FIGURE 1 – Architecture R5BC (niveau journal) intégrant la séparation des flux physique et numérique, l'évaluation environnementale (INIES/FDES, ACV, RE2020), la tokenisation carbone (CO₂ évité) et la sécurisation assurantielle des matériaux de réemploi via passeport numérique et smart contracts.

- le **flux physique** (logistique inverse des composants du bâtiment A vers le bâtiment B) ;
- le **flux environnemental** (INIES/FDES, ACV, CO₂ évité, conformité RE2020) ;
- le **flux numérique** (blockchain, passeport numérique, oracles, smart contracts) ;
- la **tokenisation carbone** (valorisation des gains environnementaux) ;
- et le **flux assurantiel** (évaluation du risque et sécurisation contractuelle compatible décennale).

1.6 Discussion : vers une assurabilité standardisée du réemploi

Le cadre proposé vise à rendre l'assurabilité du réemploi *opérationnelle* en alignant trois exigences :

1. **Exigence technique** : conformité prouvée et conditions d'emploi clairement définies ;
2. **Exigence temporelle** : RUL compatible (au minimum) avec l'horizon décennal, avec marge selon criticité ;
3. **Exigence de preuve** : traçabilité, auditabilité et non-répudiation des informations via blockchain.

En structurant un dossier numérique unifié (passeport matériau) et en automatisant des règles de validation (smart contracts), R5BC réduit l'incertitude informationnelle, facilite la gestion des responsabilités et ouvre la voie à des contrats d'assurance intégrant explicitement le réemploi dans un cadre compatible avec la décennale, tout en couplant la logique de confiance à une valorisation carbone mesurable. Cette proposition se distingue de la littérature existante, qui traite souvent séparément la circularité des matériaux [16, 12], la logistique inverse [8, 9], la traçabilité blockchain [17, 14] et les passeports matériaux [11, 10], sans les intégrer dans une perspective assurantielle unifiée.

1.7 Exemple numérique d'illustration : assurabilité décennale d'un composant réemployé avec traçabilité R5BC et tokenisation carbone

Cette sous-section propose un exemple numérique simplifié, mais structuré, illustrant comment la *durée de vie résiduelle* (RUL), la *conformité technique* et la *preuve numérique blockchain* (R5BC) peuvent soutenir l'établissement d'un contrat d'assurance compatible avec l'horizon décennal, tout en quantifiant et valorisant le CO₂ évité via INIES/FDES et ACV (RE2020), conformément aux cadres méthodologiques d'ACV et aux approches de construction circulaire existantes [1, 16, 12].

1.7.1 Données du cas et hypothèses

On considère le réemploi, dans le bâtiment B , d'un lot de poutres métalliques issu d'un chantier de déconstruction sélective (bâtiment A). Le lot comporte $N = 12$ poutres identiques (même référence géométrique), utilisées comme éléments *semi-structurels* (classe $K = 2$) dans une zone intérieure non agressive.

Hypothèses techniques (RUL et criticité).

- Durée de vie de référence : $L_{\text{tot}} = 50$ ans (acier en environnement intérieur standard).
- Âge estimé en service antérieur : $L_{\text{used}} = 18$ ans.
- Marge de sécurité décennale : $\Delta = 5$ ans (criticité semi-structurale et incertitude modérée).

La condition d'assurabilité (version prudente) devient :

$$\text{RUL} \geq 10 + \Delta. \quad (6)$$

Hypothèses environnementales (INIES/FDES, ACV et RE2020). On associe le lot à une FDES (ou proxy INIES) pour la production d'acier de construction. L'unité fonctionnelle retenue est le kilogramme de produit, conforme aux usages ACV [1].

- Masse par poutre : $m = 120$ kg.
- Facteur carbone de référence (acier neuf) : $e_{\text{neuf}} = 1.90$ kgCO₂e/kg.
- Impacts du réemploi (dépose + tri + tests + transport + stockage + remise en état) : $e_{\text{réemploi}} = 0.25$ kgCO₂e/kg.

Règle de tokenisation carbone (R5BC). On suppose un jeton carbone R5BC représentant 1 kgCO₂e évité. Ainsi, le nombre de jetons émis est égal à la quantité totale de CO₂ évitée.

1.7.2 Étape 1 : calcul de la durée de vie résiduelle et vérification décennale

La durée de vie résiduelle s'écrit :

$$\text{RUL} = L_{\text{tot}} - L_{\text{used}} = 50 - 18 = 32 \text{ ans.} \quad (7)$$

La condition (6) impose :

$$10 + \Delta = 10 + 5 = 15 \text{ ans.}$$

On obtient :

$$\text{RUL} = 32 \text{ ans} \geq 15 \text{ ans,} \quad (8)$$

ce qui satisfait le critère temporel décennal avec marge de sécurité.

1.7.3 Étape 2 : score de conformité technique et règle de décision

On introduit un score synthétique de conformité technique $\mathcal{C}_{\text{tech}} \in [0, 1]$, agrégeant trois preuves :

- inspection visuelle (c_1),
- contrôles non destructifs (c_2),
- vérification dimensionnelle et état de surface (c_3).

Pour l'exemple, on retient :

$$c_1 = 0.95, \quad c_2 = 0.85, \quad c_3 = 0.90,$$

et une pondération $(w_1, w_2, w_3) = (0.4, 0.4, 0.2)$. Donc :

$$\mathcal{C}_{\text{tech}} = \sum_{i=1}^3 w_i c_i = 0.4(0.95) + 0.4(0.85) + 0.2(0.90) = 0.90. \quad (9)$$

On applique une règle simple d'éligibilité au réemploi assurable :

$$\text{Éligible si } \begin{cases} \text{RUL} \geq 10 + \Delta, \\ \mathcal{C}_{\text{tech}} \geq \tau, \end{cases} \quad \text{avec } \tau = 0.80. \quad (10)$$

Comme $\mathcal{C}_{\text{tech}} = 0.90 \geq 0.80$, le critère de conformité est satisfait.

1.7.4 Étape 3 : quantification ACV et calcul du CO₂ évité

La masse totale réemployée est :

$$M = N \times m = 12 \times 120 = 1440 \text{ kg}. \quad (11)$$

L'impact de référence (matériau neuf) vaut :

$$\text{CO}_{2,\text{neuf}} = M \times e_{\text{neuf}} = 1440 \times 1.90 = 2736 \text{ kgCO}_2\text{e}. \quad (12)$$

L'impact associé au réemploi vaut :

$$\text{CO}_{2,\text{reemploi}} = M \times e_{\text{reemploi}} = 1440 \times 0.25 = 360 \text{ kgCO}_2\text{e}. \quad (13)$$

Ainsi, le CO₂ évité (compatible avec une justification RE2020 via FDES/INIES) est :

$$\text{CO}_{2,\text{vit}} = \text{CO}_{2,\text{neuf}} - \text{CO}_{2,\text{reemploi}} = 2736 - 360 = 2376 \text{ kgCO}_2\text{e}. \quad (14)$$

1.7.5 Étape 4 : tokenisation carbone R5BC

Avec 1 jeton = 1 kgCO₂e évité, le nombre de jetons émis est :

$$T = \text{CO}_{2,\text{vit}} = 2376 \text{ tokens}. \quad (15)$$

Le smart contract R5BC peut implémenter la règle suivante :

$$\text{if } (\text{RUL} \geq 10 + \Delta \wedge \mathcal{C}_{\text{tech}} \geq \tau) \text{ then mint}(T). \quad (16)$$

1.7.6 Étape 5 : paquet de preuve pour l'assurance (décennale)

Le *paquet de preuve* transmis à l'assureur est constitué de :

- **Passeport numérique matériau** : identifiants, origine, logistique inverse, historique.
- **Rapport de diagnostic** : résultats des contrôles, preuves photographiques, PV d'essais.
- **RUL** : calcul (7), marge Δ et justification.
- **Justification environnementale** : rattachement FDES/INIES, ACV (12)–(14).
- **Attestation blockchain** : hash des documents, horodatage, événements de validation et tokenisation (15).

Dans cet exemple, la décision assurantielle est facilitée par l'objectivation du risque :

$$\mathcal{R} = f(\text{RUL} = 32, \mathcal{C}_{\text{tech}} = 0.90, K = 2, \mathcal{U} = \text{modérée}), \quad (17)$$

et par la disponibilité d'un registre auditable réduisant l'incertitude documentaire.

1.7.7 Synthèse des résultats

- **Assurabilité temporelle** : $\text{RUL} = 32 \text{ ans} > 15 \text{ ans}$ (décennale + marge).
- **Conformité technique** : $\mathcal{C}_{\text{tech}} = 0.90 \geq 0.80$.
- **Bénéfice environnemental** : $\text{CO}_2, \text{ vit} = 2376 \text{ kgCO}_2\text{e}$.
- **Tokenisation R5BC** : $T = 2376$ jetons carbone émis.
- **Preuve auditable** : passeport numérique + smart contract + horodatage.

Cet exemple illustre comment le cadre R5BC peut simultanément (i) sécuriser l'intégration de composants réemployés au regard de l'horizon décennal par une approche RUL et conformité, (ii) apporter une justification environnementale alignée RE2020 via INIES/FDES et ACV, et (iii) activer un mécanisme de valorisation économique via la tokenisation carbone.

2 Rôle d'une blockchain *publique* consultable par l'assureur : transparence, auditabilité et non-répudiation

Dans le cadre assurantiel, l'enjeu principal du réemploi n'est pas uniquement la performance technique intrinsèque d'un composant, mais la capacité à fournir une *preuve robuste, transparente et vérifiable* des éléments de conformité (diagnostic, essais, conditions d'usage) et des hypothèses associées (RUL, ACV, rattachement FDES/INIES). Pour répondre à cette exigence, le modèle R5BC considère que l'infrastructure blockchain doit être **publique et consultable par l'assureur**, afin de garantir un niveau maximal de transparence et de confiance inter-acteurs, en cohérence avec les promesses de la blockchain pour la gouvernance des chaînes d'approvisionnement durables et des systèmes constructifs [17, 13, 14, 15].

Principe : registre public et preuves cryptographiques. La blockchain publique joue le rôle de *registre d'audit* : elle permet à tout tiers autorisé (notamment l'assureur) de vérifier l'existence, l'intégrité et la chronologie des informations relatives à un matériau réemployé, sans dépendre d'un acteur unique. Les documents techniques (rapports d'essais, photos, PV, certificats, fiches logistiques, justificatifs ACV) ne sont pas nécessairement stockés *en clair* à l'intérieur de la blockchain, mais leurs *empreintes cryptographiques (hash)* et leurs métadonnées de preuve (horodatage, signataires, identifiants) sont inscrites de manière immuable. Ainsi, toute modification a posteriori est détectable, ce qui renforce la *non-répudiation*.

Séparation données *on-chain* / *off-chain*. Afin de concilier transparence et conformité (confidentialité industrielle, données personnelles), une architecture hybride est recommandée :

- **On-chain (public)** : identifiant du composant, événements de cycle de vie (dépose, tri, diagnostic, validation, transfert, intégration), signatures, horodatages, hash des preuves, résultat de validation (éligible / non éligible), métriques synthétiques (classe d’usage, RUL agrégé, CO₂ évité agrégé), identifiant du token carbone.
- **Off-chain (stockage sécurisé)** : rapports détaillés, données d’essais complètes, photos haute résolution, fichiers ACV complets, documents contractuels. Ces éléments sont accessibles via liens ou pointeurs (URI) et vérifiables par comparaison de hash.

Consultabilité par l’assurance : vérification indépendante et traçabilité complète. La consultabilité publique permet à l’assureur de vérifier de manière indépendante :

1. **L’origine et la chaîne de possession** (chain-of-custody) : qui a détenu le composant et à quel moment.
2. **La cohérence temporelle** : date du diagnostic, date de validation, date d’intégration dans le bâtiment B .
3. **L’intégrité des preuves** : correspondance entre les documents fournis et leurs hash inscrits on-chain.
4. **Les règles de décision** appliquées par le smart contract : respect des seuils RUL et $\mathcal{C}_{\text{tech}}$.
5. **La tokenisation carbone** : cohérence entre CO₂ évité et tokens émis (traçabilité des gains environnementaux).

Règle de validation auditable (exemple). Le smart contract implémente des règles simples et auditables, par exemple :

$$\text{Eligible} \Leftrightarrow (\text{RUL} \geq 10 + \Delta) \wedge (\mathcal{C}_{\text{tech}} \geq \tau) \wedge (K \leq K_{\text{max}}), \quad (18)$$

où K représente la criticité (structurel, semi-structurel, non structurel). Les paramètres Δ , τ et K_{max} peuvent être rendus publics et versionnés, afin que l’assureur puisse vérifier *a posteriori* le contexte réglementaire/technique ayant conduit à la validation.

Garanties assurantielles rendues possibles. En pratique, une blockchain publique consultable par l’assurance permet :

- d’augmenter la **confiance** en réduisant le risque de falsification documentaire ;
- d’améliorer l’**évaluabilité du risque** par accès à une preuve unifiée et immuable ;
- de faciliter l’**acceptation contractuelle** (clauses dédiées au réemploi) ;
- de soutenir la **standardisation** de l’assurabilité du réemploi à l’échelle du secteur.

Remarque sur la transparence et la conformité. La transparence maximale ne signifie pas divulgation intégrale : elle s’obtient par la *publicité des preuves* (hash, signatures, horodatage, événements) et par la *vérifiabilité* des documents off-chain, tout en respectant les contraintes de confidentialité. Ce compromis est particulièrement adapté aux usages assurantiels, car il fournit une base objective de contrôle sans créer de risque juridique lié à la divulgation de données sensibles.

Références

- [1] Environmental management – life cycle assessment – principles and framework, 2006.
- [2] Katherine T. Adams, Mohamed Osmani, Tony Thorpe, and James Thornback. Circular economy in construction : Current awareness, challenges and enablers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management*, 170(1) :15–24, 2017.
- [3] Lukman A. Akanbi, Lukumon O. Oyedele, Kemi Omoteso, Muhammad Bilal, and Olugbenga O. Akinade. Salvaging building materials in a circular economy : A bim-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*, 129 :175–186, 2018.
- [4] O. O. Akinade, L. O. Oyedele, and M. Bilal. Material banks and circular building supply chains : Digital platforms for construction material reuse. *Resources, Conservation and Recycling*, 199 :107266, 2024.
- [5] Abdol R. Chini and Steven F. Bruening. Deconstruction and materials reuse in the united states. In *The Future of Sustainable Construction*, pages 189–209. IOS Press, 2007.
- [6] Tim Cooper and Tom Fisher. Design for reuse in the built environment : A review of principles and practices. *Journal of Industrial Ecology*, 17(4) :573–584, 2013.
- [7] Martin Geissdoerfer, Paulo Savaget, Nancy Bocken, and Erik Hultink. The circular economy – a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143 :757–768, 2017.
- [8] V. Daniel R. Guide and Luk N. Van Wassenhove. The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 51(1) :10–18, 2003.
- [9] V. Daniel R. Guide and Luk N. Van Wassenhove. *Closed-Loop Supply Chains : New Developments to Improve the Sustainability of Business Practices*. CRC Press, Boca Raton, 2009.
- [10] M. Heinrich and W. Lang. Material passports and material banks for circular construction : Emerging digital tools for sustainable building management. *Journal of Cleaner Production*, 386 :135734, 2023.
- [11] M. Honic, I. Kovacic, and H. Rechberger. Digital product passports for circular construction : Enabling traceability and material reuse in the built environment. *Resources, Conservation and Recycling*, 188 :106659, 2023.
- [12] Md. Uzzal Hossain, S. Thomas Ng, Maxwell Antwi-Afari, and Ben Amor. Sustainable construction and the circular economy : A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 245 :118884, 2020.
- [13] Mahtab Kouhizadeh, Sara Saberi, and Joseph Sarkis. Blockchain technology and the sustainable supply chain : Theoretically exploring adoption barriers. *International Journal of Production Economics*, 231 :107831, 2021.
- [14] Jun Li, David Greenwood, and Mohamad Kassem. Blockchain in the built environment and construction industry : A systematic review, conceptual models and practical use cases. *Automation in Construction*, 102 :288–307, 2019.
- [15] Bo Niu, Hongyang Li, Hong Li, and Hao Liu. Blockchain for smart construction : A systematic literature review. *Automation in Construction*, 122 :103440, 2021.
- [16] Francesco Pomponi and Alice Moncaster. Circular economy for the built environment : A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143 :710–718, 2017.
- [17] Sara Saberi, Mahtab Kouhizadeh, Joseph Sarkis, and Lejia Shen. Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7) :2117–2135, 2019.

- [18] United Nations Environment Programme. 2022 global status report for buildings and construction, 2022.
- [19] Y. Wang, H.-Y. Chong, and X. Wang. Blockchain-enabled circular supply chains in construction : Enhancing transparency and traceability of reused materials. *Automation in Construction*, 156 :105067, 2024.
- [20] L. Zhang, H. Luo, and H. Li. Blockchain-based digital twins for circular construction supply chains. *Automation in Construction*, 170 :105582, 2025.