

Passeport Numérique des Matériaux dans le Modèle R5BC

Traçabilité environnementale et valorisation carbone basée sur la blockchain

Chaire R5BC Team

11 mars 2026

Résumé

Le modèle R5BC (*Return–Repair–Reuse–Recycle based on Blockchain*) propose une approche intégrée combinant logistique inverse des matériaux de construction, traçabilité environnementale basée sur la base nationale INIES, et certification numérique via la blockchain. Cet article introduit le concept de passeport numérique des matériaux permettant d’assurer la traçabilité technique, environnementale et économique des composants réemployés dans les chaînes d’approvisionnement circulaires du secteur du bâtiment.

1 Introduction

Le secteur du bâtiment représente une part significative des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Dans ce contexte, le réemploi des matériaux constitue une stratégie essentielle pour réduire l’empreinte carbone de la construction. Cependant, l’absence de systèmes robustes de traçabilité et de certification limite fortement l’adoption de ces pratiques.

Le modèle R5BC vise à répondre à ces défis en combinant la logistique inverse des matériaux, les référentiels environnementaux du bâtiment et les technologies blockchain afin de garantir la transparence et la fiabilité des données associées aux matériaux réemployés.

2 Architecture du Passeport Numérique R5BC

Le *Passeport Numérique R5BC* constitue le noyau informationnel du système proposé. Il permet d’assurer une traçabilité complète des matériaux récupérés depuis leur déconstruction jusqu’à leur réintégration dans un nouveau bâtiment.

Dans les approches conventionnelles de réemploi, les informations relatives aux matériaux sont souvent dispersées entre différents acteurs de la chaîne logistique. Le passeport

numérique permet de centraliser ces informations dans une structure de données unifiée intégrant les dimensions techniques, environnementales et logistiques.

Le système comprend plusieurs modules fonctionnels :

- **Identité du matériau** : identifiant unique, QR code ou hash numérique, type de matériau et métadonnées principales.
- **Origine et traçabilité** : site d'origine, date de dépose, plateforme de tri et historique logistique.
- **Évaluation technique** : inspection, essais mécaniques et certification du matériau pour le réemploi.
- **Référence environnementale INIES** : association du matériau à une FDES spécifique, générique ou à un proxy environnemental lorsque la référence exacte n'est pas disponible.
- **Calcul du carbone évité** : comparaison entre l'impact carbone du matériau neuf et celui du matériau réemployé.
- **Tokenisation carbone** : conversion des émissions évitées en actifs numériques valorisables.
- **Certification blockchain** : ancrage des données critiques sur la blockchain afin d'assurer leur intégrité et leur auditabilité.

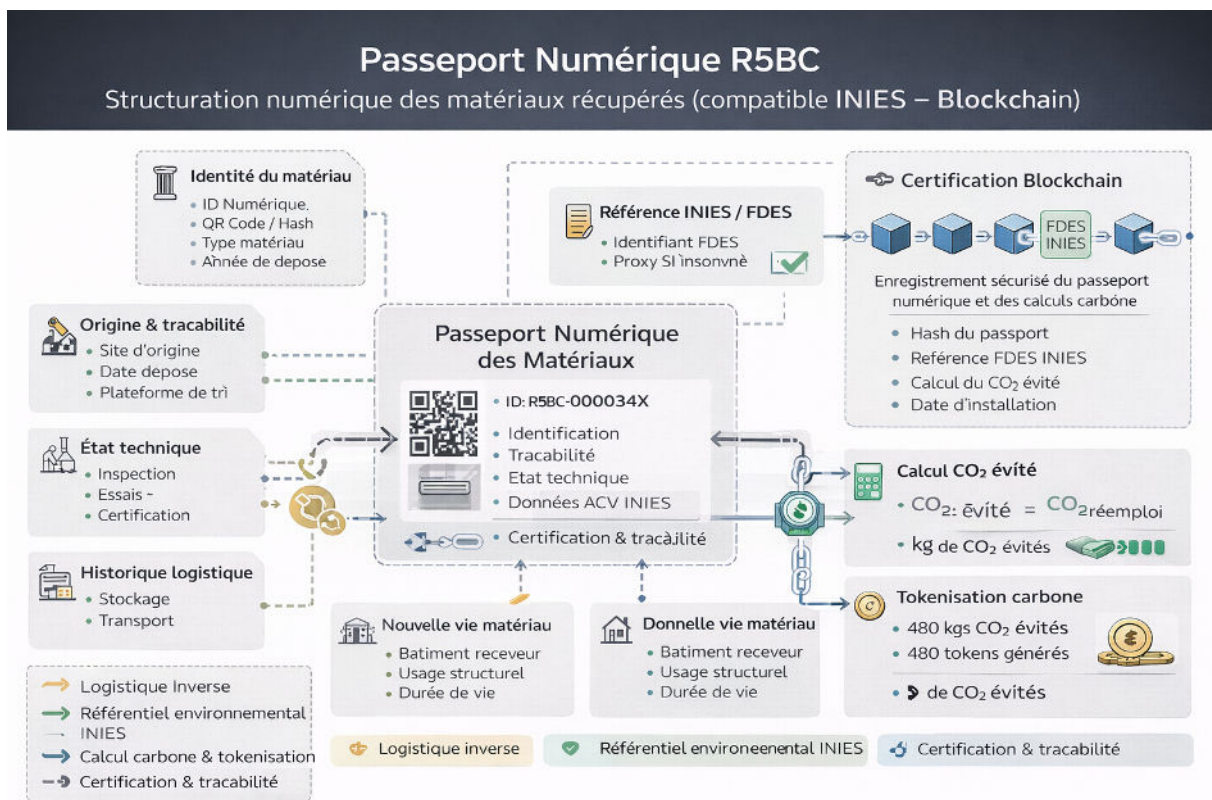


FIGURE 1 – Architecture du Passeport Numérique R5BC intégrant la logistique inverse, la référence environnementale INIES/FDES, le calcul du carbone évité, la tokenisation carbone et la certification blockchain.

3 Calcul du carbone évité

Le carbone évité associé au réemploi d'un matériau est calculé à partir de la différence entre l'impact carbone d'un produit neuf et celui du scénario de réemploi.

$$CO_2^{evite} = CO_2^{neuf} - CO_2^{reemploi} \quad (1)$$

où :

- CO_2^{neuf} représente l'impact carbone du produit neuf issu des données FDES INIES
- $CO_2^{reemploi}$ correspond à l'impact associé aux opérations de dépose, transport et remise en état du matériau

4 Schéma scientifique du Passeport Numérique R5BC, modèle de données JSON compatible INIES et architecture blockchain

4.1 Schéma scientifique du Passeport Numérique R5BC

4.1.1 Logique scientifique

Le Passeport Numérique R5BC peut être structuré autour de trois couches interdépendantes, permettant d'articuler de manière cohérente les dimensions physiques, informationnelles et numériques du réemploi des matériaux de construction.

Couche 1 — Couche physique et logistique inverse Cette première couche décrit le cycle réel du matériau récupéré dans la chaîne de logistique inverse. Elle couvre les opérations successives de dépose ou de déconstruction, de tri, de contrôle, de stockage, de transport, puis de réintégration dans un nouveau chantier. Elle représente ainsi la trajectoire physique du matériau depuis sa sortie du bâtiment d'origine jusqu'à sa réutilisation effective dans un nouveau projet.

Couche 2 — Couche informationnelle et environnementale Cette deuxième couche centralise l'ensemble des données nécessaires à la qualification du matériau et à l'évaluation de sa performance environnementale. Elle comprend notamment l'identité du matériau, ses caractéristiques techniques, son état de dégradation, sa durée de vie résiduelle, la référence INIES associée, la FDES spécifique, générique ou le proxy environnemental mobilisé, les données ACV associées ainsi que le calcul du carbone évité. Cette couche constitue le noyau méthodologique du passeport, car elle relie le matériau physique à un référentiel environnemental exploitable dans les démarches de calcul bâtiment.

Couche 3 — Couche de confiance numérique La troisième couche assure la fiabilité, l'intégrité et la gouvernance du passeport numérique. Elle intègre les fonctions de certification, de contrôle d'intégrité des données, de traçabilité des versions, d'exécution de smart contracts, de tokenisation carbone et d'auditabilité blockchain. Cette couche garantit que les informations critiques liées au matériau et à sa valorisation carbone sont sécurisées, horodatées et non altérables.

4.1.2 Formulation synthétique pour l'article

Le schéma scientifique du Passeport Numérique R5BC peut être présenté selon une logique *entrées – traitements – sorties*.

Entrées Les entrées principales du système sont constituées du matériau récupéré, des données de déconstruction, des résultats d'inspection technique et de la référence environnementale INIES/FDES mobilisée pour l'évaluation du matériau.

Traitements Les traitements incluent la qualification technique du matériau, l'appariement entre le matériau récupéré et une FDES ou un proxy pertinent, le calcul ACV comparatif entre le scénario de produit neuf et le scénario de réemploi, le calcul du CO₂ évité, puis la validation finale par smart contract.

Sorties Les sorties du système comprennent un passeport numérique certifié, un historique traçable des opérations, une valeur carbone associée au matériau, un volume de jetons carbone R5BC correspondant aux émissions évitées, ainsi qu'un justificatif mobilisable dans les démarches compatibles avec la RE2020.

4.2 Modèle de base de données JSON compatible INIES

Afin d'assurer l'interopérabilité entre la logique R5BC, les bases documentaires, les API métier et les smart contracts, le passeport peut être représenté par un modèle JSON structuré. Ce modèle organise les données relatives à l'identité du matériau, à sa traçabilité, à son évaluation technique, à sa référence environnementale, à son bilan carbone, à sa tokenisation et à son ancrage blockchain.

Le modèle JSON suivant illustre une structuration complète et extensible du Passeport Numérique R5BC :

```
{
  "passport_id": "R5BC-FR-MAT-000001",
  "version": "1.0",
  "timestamp_created": "2026-03-11T20:30:00Z",
  "timestamp_updated": "2026-03-11T20:30:00Z",
```

```

"material_identity": {
  "material_type": "Poutre acier",
  "product_family": "Structure métallique",
  "material_category": "Construction",
  "description": "Poutre métallique récupérée sur bâtiment tertiaire",
  "original_manufacturer": "Unknown",
  "installation_year_estimated": 2008,
  "deconstruction_year": 2026,
  "quantity": 12,
  "unit": "piece",
  "mass_kg": 4200,
  "functional_unit": "1 kg de poutre acier réemployée"
},

"origin_traceability": {
  "source_building": {
    "name": "Bâtiment A",
    "type": "Bâtiment tertiaire",
    "location": {
      "country": "France",
      "city": "Metz",
      "address": "Zone industrielle X"
    }
  }
},

"deconstruction": {
  "date": "2026-02-15",
  "company": "Entreprise Déconstruction Lorraine",
  "method": "Dépose sélective"
},

"sorting_platform": {
  "name": "Plateforme R5BC Metz",
  "location": "Metz"
},

"transport": [
  {
    "date": "2026-02-16",
    "mode": "Camion",
    "distance_km": 24,

```

```

        "carrier": "Transporteur X"
    }
]
},

"technical_assessment": {
    "inspection_visual": {
        "status": "Conforme",
        "comments": "Absence de corrosion majeure"
    },
    "mechanical_tests": [
        {
            "test_type": "Contrôle dimensionnel",
            "result": "Conforme"
        },
        {
            "test_type": "Contrôle ultrasons",
            "result": "Conforme"
        }
    ],
    "reuse_class": "A",
    "residual_life_years": 25,
    "repair_required": false,
    "repair_description": "",
    "certification_status": "Validated for reuse"
},

"inies_reference": {
    "inies_match_type": "generic_fdes",
    "inies_database_reference": "INIES",
    "fdes_id": "FDES-STEEL-2024-001",
    "fdes_name": "Profilés acier laminés à chaud",
    "fdes_type": "collective",
    "publisher": "Organisme sectoriel",
    "publication_year": 2024,
    "validity_end": "2029-12-31",
    "declared_unit": "1 kg",
    "geographical_scope": "France",
    "proxy_used": false,

```

```

    "proxy_justification": ""
  },

  "lca_data": {
    "reference_scenario": {
      "scenario_type": "new_product_reference",
      "assumptions": "Comparaison avec un produit neuf équivalent"
    },
    "modules": {
      "A1_A3": {
        "gwp_kgco2e": 1.85,
        "energy_mj": 22.4,
        "water_l": 3.1
      },
      "A4": {
        "gwp_kgco2e": 0.08
      },
      "A5": {
        "gwp_kgco2e": 0.03
      },
      "B": {
        "gwp_kgco2e": 0.00
      },
      "C1_C4": {
        "gwp_kgco2e": 0.22
      },
      "D": {
        "gwp_kgco2e": -0.35
      }
    },
    "total_new_reference_gwp_kgco2e_per_kg": 2.18
  },

  "reuse_scenario": {
    "reuse_process": {
      "cleaning_gwp_kgco2e_per_kg": 0.03,
      "inspection_gwp_kgco2e_per_kg": 0.01,
      "repair_gwp_kgco2e_per_kg": 0.00,
      "remanufacturing_gwp_kgco2e_per_kg": 0.00,

```

```

    "transport_gwp_kgco2e_per_kg": 0.06
  },
  "total_reuse_gwp_kgco2e_per_kg": 0.10
},

"carbon_avoided": {
  "method": "new_vs_reuse_difference",
  "reference_new_gwp_kgco2e_per_kg": 2.18,
  "reuse_gwp_kgco2e_per_kg": 0.10,
  "avoided_gwp_kgco2e_per_kg": 2.08,
  "total_avoided_gwp_kgco2e": 8736
},

"re2020_compatibility": {
  "usable_for_re2020": true,
  "indicator_target": "IC construction",
  "module_d_considered": true,
  "methodological_note": "Référence FDES INIES + scénario réemploi documenté"
},

"tokenization": {
  "tokenization_enabled": true,
  "carbon_token_standard": "R5BC-Carbon-Token",
  "conversion_rule": "1 token = 1 kgCO2e avoided",
  "tokens_generated": 8736,
  "carbon_price_reference_eur_per_ton": 90,
  "estimated_value_eur": 786.24
},

"blockchain_anchor": {
  "network": "Polygon",
  "smart_contract_address": "0xR5BC123456789",
  "token_contract_address": "0xTOKEN123456789",
  "passport_hash_sha256":
    "8f0f0b4e1d3f7d4b0b7e4d4e3f9f9a6b1234567890abcdef1234567890abcd",
  "metadata_uri": "ipfs://QmR5BCPassportMetadataHash",
  "transaction_history": [
    {
      "event": "passport_created",

```

```
    "timestamp": "2026-03-11T20:31:00Z",
    "tx_hash": "0xabc001"
  },
  {
    "event": "technical_validation",
    "timestamp": "2026-03-11T20:35:00Z",
    "tx_hash": "0xabc002"
  },
  {
    "event": "carbon_token_minted",
    "timestamp": "2026-03-11T20:40:00Z",
    "tx_hash": "0xabc003"
  }
]
},
```

```
"new_life_cycle": {
  "receiving_building": {
    "name": "Projet B",
    "location": "Nancy, France",
    "building_type": "Bâtiment mixte"
  },
  "installation_date": "2026-04-10",
  "structural_use": "Poutre secondaire",
  "projected_service_life_years": 25
},
```

```
"governance": {
  "validated_by": [
    "Expert technique agréé",
    "Opérateur R5BC",
    "Auditeur environnemental"
  ],
  "approval_status": "Approved",
  "document_links": [
    "inspection_report.pdf",
    "test_results.pdf",
    "fdes_reference.pdf"
  ]
}
```

}
}

Ce modèle met en évidence la capacité du passeport à agréger, dans une seule structure, les données de terrain, les données environnementales issues d'INIES, les calculs carbone, les règles de tokenisation et les preuves numériques nécessaires à la certification blockchain.

4.3 Architecture blockchain complète du passeport

4.3.1 Principe général

L'architecture blockchain du Passeport Numérique R5BC doit reposer sur une séparation claire entre les données lourdes stockées hors chaîne et les preuves critiques stockées sur chaîne.

A. Données lourdes stockées hors chaîne Afin d'éviter des coûts excessifs de stockage et de traitement sur la blockchain, les éléments documentaires volumineux sont conservés hors chaîne. Il s'agit notamment des rapports d'inspection, des documents PDF, des résultats d'essais, des FDES référencées, des photographies et des données ACV détaillées. Ces éléments peuvent être stockés dans IPFS, dans une base documentaire sécurisée, ou encore dans un cloud souverain ou un serveur institutionnel.

B. Preuves critiques stockées sur chaîne En revanche, seules les données à forte valeur de preuve sont ancrées sur la blockchain. Il s'agit de l'identifiant du passeport, du hash cryptographique du dossier, de la référence INIES/FDES utilisée, de la version méthodologique, du statut de validation, de la quantité de CO₂ évité, de la quantité de tokens émis et des principaux événements du cycle de vie du matériau.

4.3.2 Architecture fonctionnelle

L'architecture fonctionnelle du passeport peut être décomposée en quatre couches.

Couche 1 — Acquisition des données Cette couche agrège les informations en provenance de plusieurs sources : opérateur de déconstruction, plateforme de tri, laboratoire de contrôle, base INIES, calculateur ACV et plateforme logistique.

Couche 2 — Moteur de traitement R5BC Cette couche réalise les fonctions de consolidation des métadonnées, de vérification de cohérence, d'appariement FDES/proxy, de calcul du scénario de réemploi, de calcul du CO₂ évité et de préparation finale des métadonnées du passeport.

Couche 3 — Stockage hors chaîne Cette couche comprend les composants de stockage documentaire et d'accès aux données, incluant une base JSON ou NoSQL, IPFS pour les documents, un système GED et une API d'accès.

Couche 4 — Smart contracts blockchain Cette dernière couche repose sur plusieurs contrats intelligents spécialisés :

1. **PassportRegistry** : crée le passeport, gère l'unicité des identifiants et enregistre le hash principal.
2. **TechnicalValidationContract** : valide ou rejette le matériau, enregistre la classe technique et horodate la décision.
3. **EnvironmentalReferenceContract** : enregistre la référence INIES/FDES, stocke le type d'appariement et verrouille les hypothèses ACV.
4. **CarbonComputationContract** : enregistre le CO₂ évité validé, conserve la méthode de calcul et empêche une double comptabilisation.
5. **CarbonTokenContract** : frappe les tokens carbone, les attribue au détenteur légitime et trace leurs transferts.
6. **LifecycleUpdateContract** : enregistre les changements d'état, le transfert de propriété, l'installation dans un nouveau bâtiment et, si nécessaire, la fin de seconde vie.

4.3.3 Flux de fonctionnement

Le fonctionnement global du système peut être décrit en six étapes successives.

Étape 1 — Création Un matériau déposé reçoit un identifiant unique, un QR code et un premier enregistrement blockchain.

Étape 2 — Qualification L'expert technique ajoute les résultats d'inspection, les essais et la classe de réemploi. Le smart contract valide ensuite l'état technique du matériau.

Étape 3 — Référence environnementale Le moteur R5BC relie le matériau soit à une FDES spécifique, soit à une FDES générique, soit à un proxy environnemental justifié. Cette référence est alors figée dans la blockchain.

Étape 4 — Calcul carbone Le système calcule l'impact carbone du matériau neuf de référence, l'impact du scénario de réemploi et le carbone évité. Le résultat validé est ensuite ancré *on-chain*.

Étape 5 — Tokenisation Le smart contract émet des tokens carbone R5BC proportionnels aux kilogrammes de CO₂e évités.

Étape 6 — Réemploi Le matériau est installé dans un nouveau bâtiment. Le passeport est alors mis à jour avec la localisation, l’usage et la durée de vie projetée.

4.3.4 Schéma conceptuel de l’architecture

Le schéma conceptuel suivant résume l’architecture de traitement et d’ancrage blockchain du Passeport Numérique R5BC : <

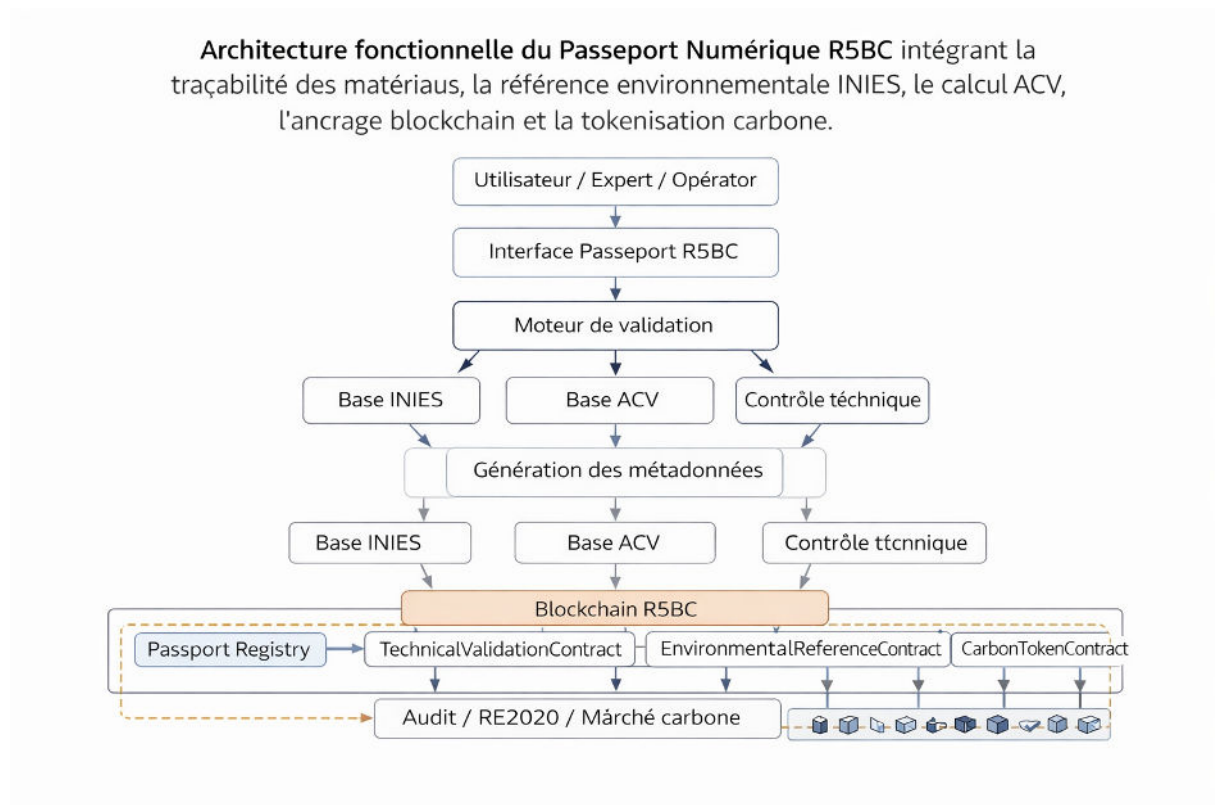


FIGURE 2 – Architecture fonctionnelle du Passeport Numérique R5BC intégrant la traçabilité des matériaux, la référence environnementale INIES, le calcul ACV, l’ancrage blockchain et la tokenisation carbone.

4.4 Proposition de structuration académique pour l’article

Cette contribution peut être structurée dans un article scientifique autour de quatre sous-sections principales.

4.4.1 Digital Product Passport Data Model

Cette sous-section porte sur la structuration des données du passeport, incluant l’identité du matériau, la traçabilité, la qualification, la référence environnementale, le scénario

ACV, la sortie carbone, les jetons et l’ancrage blockchain.

4.4.2 Interoperability with INIES

Cette partie traite de l’interopérabilité avec INIES, en présentant la liaison à une FDES spécifique, le recours à une FDES générique en mode *fallback*, la mobilisation d’un proxy validé et la justification méthodologique associée.

4.4.3 Blockchain Governance Layer

Cette sous-section développe la couche de gouvernance blockchain en mettant l’accent sur le hashing, l’horodatage, le versioning, la validation par smart contract et la prévention de la double comptabilisation.

4.4.4 Carbon Tokenization Layer

Enfin, cette partie présente la logique de tokenisation carbone à travers la règle de conversion, l’émission, l’allocation des tokens et leur valorisation économique.

4.5 Formulation scientifique courte réutilisable

La formulation scientifique courte suivante peut être insérée directement dans un article en langue anglaise :

Le Passeport Numérique R5BC est structuré comme une architecture de données multicouche intégrant l’identité du matériau, la traçabilité de la logistique inverse, la validation technique, des références environnementales compatibles avec INIES, la comptabilisation carbone sur l’ensemble du cycle de vie, ainsi qu’une certification fondée sur la blockchain. Cette architecture garantit la transparence méthodologique, évite la double comptabilisation des émissions évitées et permet la tokenisation des économies de carbone vérifiées associées au réemploi des matériaux de construction.

5 Conclusion

Le passeport numérique R5BC constitue une infrastructure essentielle pour structurer la traçabilité des matériaux dans une économie circulaire du bâtiment. En combinant les référentiels environnementaux du secteur de la construction avec des mécanismes de certification blockchain, cette approche permet de renforcer la confiance dans les processus de réemploi et de faciliter la valorisation des bénéfices carbone associés.