

Démarche R5BC appliquée au réemploi des matériaux

Logistique inverse + INIES (FDES/ACV) + Blockchain (traçabilité)

Institut en Innovation Logistique (I2L) – KRYPTOSTONE

12 mars 2026

1 Objectif opérationnel

L'objectif de la démarche R5BC est de mettre en place une chaîne de réemploi où chaque matériau récupéré devient :

- **Traçable** (preuve d'origine, d'état et de transformations) ;
- **Qualifié** (aptitude au réemploi, niveau de qualité) ;
- **Mesurable** (quantification du CO₂ évité via INIES/FDES) ;
- **Réutilisable** dans un nouveau projet avec une **preuve vérifiable**.

La sortie cible est la production d'un **Passeport Numérique de Réemploi** permettant de sécuriser la confiance entre acteurs (déconstruction, logistique, plateformes de réemploi, maîtrise d'ouvrage).

2 Chaîne de valeur “de chantier à chantier” (logistique inverse)

La chaîne de valeur R5BC se structure en cinq étapes opérationnelles (A–E), depuis l'identification sur site jusqu'à la valorisation incitative optionnelle.

2.1 Étape A — Identification sur site (chantier / dépose / déconstruction)

Actions.

- Inventaire des gisements (BIM, DOE, repérage, scans, photos) ;
- Séparation “réemploi” vs “recyclage” vs “déchet” ;
- Création d'un **ID unique** pour chaque lot/élément (QR/RFID).

Données minimales captées.

- Type de matériau (acier, menuiserie, dalle, faux-plafond, etc.) ;
- Dimensions / quantités ;
- Localisation et contexte (chantier, zone, date) ;
- Photos + état initial ;
- Risques / contraintes (amiante, plomb, conformité).

Déclencheur blockchain. La création de l'ID unique déclenche l'enregistrement initial sur blockchain et la création d'un **jumeau numérique** du matériau (lot ou pièce).

2.2 Étape B — Qualification technique (tri, inspection, tests)

Actions.

- Contrôle visuel + tests (résistance, humidité, corrosion, etc.) ;
- Classement qualité : **A** (réemploi direct), **B** (réemploi avec remise en état), **C** (recyclage) ;
- Attribution d'un score de réemployabilité.

Données.

- Résultats de tests ;
- Certification éventuelle / organisme / opérateur ;
- Définition de l’usage futur autorisé (structurel / non structurel).

Traçabilité blockchain. La blockchain enregistre les preuves (résultats, opérateur, date, version), assurant une traçabilité des contrôles et une auditabilité de la qualification.

2.3 Étape C — Référence environnementale via INIES (FDES/ACV)

Problématique. Une FDES est, en principe, associée à un **produit de construction neuf** ou à une **famille de produits**. Le réemploi nécessite donc une méthode de rattachement robuste.

Solution R5BC (pragmatique et robuste). Le matériau récupéré est rattaché à :

- une **FDES spécifique** si elle existe (produit identifié), **ou**
- une **FDES générique** (famille) si la référence exacte est inconnue, **ou**
- un **proxy INIES** (matériau équivalent) avec justification.

Sorties principales.

- Impact carbone “neuf” de référence (kgCO₂e / unité) ;
- Hypothèses sur le module D / scénario fin de vie ;
- Données nécessaires à RE2020 (selon l’usage).

Traçabilité méthodologique. La blockchain ancre la référence INIES utilisée ainsi que les hypothèses retenues, garantissant la transparence et la reproductibilité du calcul.

2.4 Étape D — Calcul du CO₂ évité “réemploi”

Principe. Le réemploi évite tout ou partie des impacts liés à la fabrication du neuf. Une approche simple consiste à définir :

$$CO2_{\text{évité}} = CO2_{\text{neuf,ref}} - CO2_{\text{réemploi}}. \quad (1)$$

Définitions.

- $CO2_{\text{neuf,ref}}$: issu de la FDES INIES (souvent A1–A3, éventuellement étendu selon le périmètre) ;
- $CO2_{\text{réemploi}}$: impacts additionnels du réemploi, pouvant inclure :
 - dépose,
 - transport,
 - remise en état,
 - stockage,
 - reconditionnement.

Lien avec l’optimisation. La démarche R5BC relie ce calcul à un modèle d’optimisation (logistique inverse) afin de minimiser $CO2_{\text{réemploi}}$ sous contraintes opérationnelles (capacités, distances, disponibilité, qualité).

2.5 Étape E — Tokenisation (option R5BC) et incitation

Principe. Après calcul et validation de $CO2_{\text{évité}}$, un “crédit” interne (**BuildToken**) peut être attribué aux acteurs :

- entreprise de déconstruction,
- logisticien,
- plateforme de réemploi,

- maître d'ouvrage.

Règle simple.

Token \propto (kgCO₂ évité) \times (coefficient : prix carbone / stratégie ESG).

Smart contract (condition de déclenchement). L'émission de token est autorisée uniquement si :

- les preuves de tests sont déposées,
- la référence INIES est enregistrée,
- la destination de réemploi est confirmée.

3 Architecture blockchain proposée (traçabilité complète)

3.1 Données enregistrées *on-chain*

- ID matériau/lot ;
- provenance (chantier, date, acteur) ;
- événements logistiques (prise en charge, transport, stockage) ;
- résultats de tests + niveau de qualité ;
- référence INIES/FDES utilisée + hypothèses ;
- calcul CO₂évité + méthode ;
- certificat de réemploi + usage autorisé ;
- transfert vers un nouveau projet.

3.2 Données conservées *off-chain* (stockage documentaire)

- PDF de rapports ;
- photos lourdes ;
- dossiers techniques ;
- DOE/BIM volumineux.

Ancrage cryptographique. La blockchain conserve :

- le **hash** des documents (preuve d'intégrité),
- des liens sécurisés (auditables) vers les pièces justificatives.

4 Sortie finale : Passeport Numérique de Réemploi

À la fin du processus, le matériau dispose d'un passeport numérique contenant :

- Identité & traçabilité ;
- Historique des opérations (logistique inverse) ;
- Qualité & aptitude au réemploi ;
- Données environnementales (INIES/FDES) ;
- CO₂évité calculé ;
- Preuve d'intégrité blockchain (audit).

Ce document sécurise la confiance sur le marché du réemploi en fournissant une preuve vérifiable, interopérable et auditable.

5 Intégration dans un modèle d'optimisation (Mixed-Integer Linear Programming - MILP)

Dans la logique d'un modèle de planification (profit / flux / contraintes), la version bâtiment ajoute notamment :

- coût de logistique inverse (collecte, transport, stockage) ;
- Coût de reconditionnement ;
- Contrainte de qualité (seuil pour réemploi) ;
- Valeur économique du matériau réemployé ;
- Valeur environnementale ($CO2_{\text{évité}}$) issue de INIES.

Objectif possible.

$$\max \Pi = \text{Marge économique} + \lambda \cdot CO2_{\text{évité}}, \quad (2)$$

où λ traduit la pondération (prix carbone, objectifs ESG, politique interne).

6 Exemple concret (illustratif)

Matériau. Portes intérieures réemployées (lot de 50).

- Référence INIES : portes équivalentes (FDES) $\rightarrow CO2_{\text{neuf}} = X \text{ kgCO}_2/\text{porte}$;
- Impacts réemploi : dépose + transport + remise en état $\rightarrow CO2_{\text{réemploi}} = y \text{ kgCO}_2/\text{porte}$;
- CO_2 évité total :

$$CO2_{\text{évité,total}} = 50 \times (X - y).$$

- Blockchain : preuves (tests, photos, conformité, destination) ;
- Passeport : portes réemployables dans un nouveau bâtiment (preuve audit).

7 Cas d'étude R5BC : Lavabo céramique (Classe A)

Nous formalisons ici un cas complet R5BC relatif au réemploi d'un lavabo en céramique, transporté sur une distance de 80 km, classé en **Classe A (réemploi direct)**. L'analyse intègre :

- La logistique inverse,
- Le calcul environnemental via FDES/INIES,
- La traçabilité blockchain,
- La génération d'un passeport numérique,
- L'intégration au modèle d'optimisation économique.

7.1 Hypothèses de base

- Matériau : Céramique sanitaire
- Transport : 80 km
- Réemploi : Direct (Classe A)
- Pas de remise en état lourde
- Nettoyage et désinfection standard

7.2 Étape 1 : Logistique inverse

Flux réel

Chantier A (rénovation) \rightarrow Dépose soigneuse \rightarrow Transport 80 km \rightarrow Plateforme de tri \rightarrow
Réintégration Chantier B

Événements blockchain enregistrés

- Création ID_LAV_0001
- Inspection Classe A
- Transport 80 km (preuve logistique)
- Validation réemploi
- Affectation au nouveau projet

7.3 Étape 2 : Référence environnementale INIES (FDES)

Pour un lavabo céramique neuf, une FDES type donne (ordre de grandeur réaliste) :

- CO₂ fabrication (A1–A3) ≈ 30 kgCO₂e / unité
- Transport neuf (A4) ≈ 2 –4 kgCO₂e
- Total neuf ≈ 32 –35 kgCO₂e

Nous retenons la valeur moyenne :

$$CO2_{\text{neuf}} = 33 \text{ kgCO}_2\text{e} \quad (3)$$

7.4 Étape 3 : Calcul du CO₂ du réemploi

Impacts du réemploi (Classe A)

- Dépose soigneuse : ≈ 1 kgCO₂e

Transport (80 km) Camion léger (approximation) :

$$0.12 \text{ kgCO}_2/\text{km} \times 80 = 9.6 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Réparti sur un chargement de 20 lavabos :

$$\frac{9.6}{20} = 0.48 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Nettoyage / désinfection

$$\approx 0.5 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

Total réemploi

$$CO2_{\text{réemploi}} \approx 1 + 0.48 + 0.5 \approx 1.98 \approx 2 \text{ kgCO}_2\text{e} \quad (4)$$

7.5 Étape 4 : CO₂ évité

$$CO2_{\text{évité}} = CO2_{\text{neuf}} - CO2_{\text{réemploi}} \quad (5)$$

$$CO2_{\text{ v t }} = 33 - 2 = 31 \text{ kgCO}_2\text{e} \quad (6)$$

7.6 Résultat environnemental

Un seul lavabo réemployé permet :

$$\approx 31 \text{ kgCO}_2\text{e évités}$$

Pour 100 lavabos :

$$\approx 3.1 \text{ tonnes de CO}_2\text{e évitées}$$

7.7 Passeport Numérique de Réemploi

Le passeport numérique contient :

Identité

- ID : LAV-0001
- Type : Lavabo céramique suspendu
- Dimensions
- Photos avant/après

Traçabilité

- Chantier source
- Date de dépose
- Transport 80 km
- Plateforme de tri
- Chantier destination

Qualité

- Classe A
- Inspection validée
- Nettoyage certifié

Environnement

- Référence FDES INIES
- CO₂ neuf : 33 kg
- CO₂ réemploi : 2 kg
- CO₂ évité : 31 kg

Blockchain

- Empreinte cryptographique (hash)
- Signature opérateur

7.8 Intégration au modèle économique R5BC

Valeur économique Exemple : prix de revente = 60 €.

a. Coûts logistique inverse

- Dépose
- Transport
- Nettoyage

b. Valeur carbone stratégique Si prix carbone implicite = 100 €/tonne :

$$31 \text{ kg} = 0.031 \text{ tonne}$$

$$0.031 \times 100 = 3.1$$

Chaque lavabo génère donc :

- Une marge économique,
- Une valeur carbone intégrable au modèle MILP.

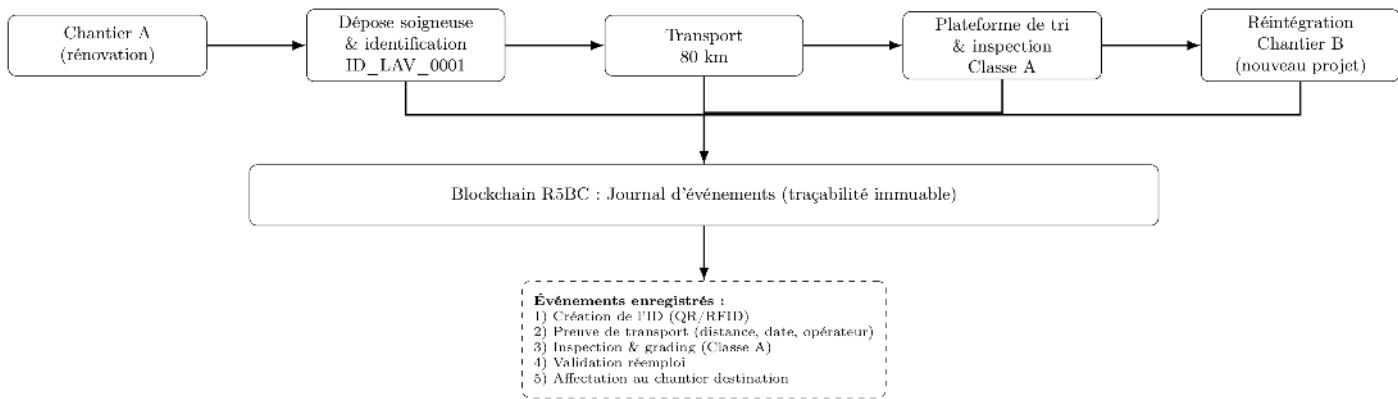


FIGURE 1 – Flux logistique inverse R5BC pour un lavabo céramique (Classe A) avec traçabilité blockchain.

7.9 Smart Contract (logique simplifiée)

Émission de BuildToken si :

- Classe A validée,
- Transport enregistré,
- Référence INIES ancrée,
- CO₂ évité calculé.

$$Token = k \times CO2_{\text{évité}} \quad (7)$$

Exemple : 1 token / kgCO₂ ⇒ 31 tokens.

7.10 Enseignements du cas

- Réemploi techniquement simple ;
- Impact carbone significatif ;
- Blockchain renforce la confiance ;
- INIES apporte la légitimité réglementaire ;
- Compatible RE2020.