Journée Scientifique de l'Alliance CircularIT

Ronzaud Thibault, Sorin Edouard, Shevchenko Tetiana

Construction – Réemployer les déchets de chantier

Ronzaud Thibault

CIRCULAR IT
LE NUMÉRIQUE AU SERVICE
DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

01

Contexte des chantiers de déconstruction, du réemploi, du recyclage et de l'économie circulaire en France

BTP, chiffres clés

LE SECTEUR DU BTP EN FRANCE ET EN EUROPE[1,2]

Génération de déchets colossale

Impacts colossaux

Pression mondiale sur les ressources

Réduire les déchets et leurs impacts

1 : ADEME, Dechets Chiffres Clés, 2023

2 : Europa. (2023). Waste statistics

Economie circulaire : cadre législatif

LE SECTEUR DU BATIMENT

2015: loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV)[3]

- **Rénovation** du parc de bâtiments existants
- **Amélioration** de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs
- **Lutte** contre les gaspillages et promotion de l'économie circulaire

2020: loi Anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC)[4]

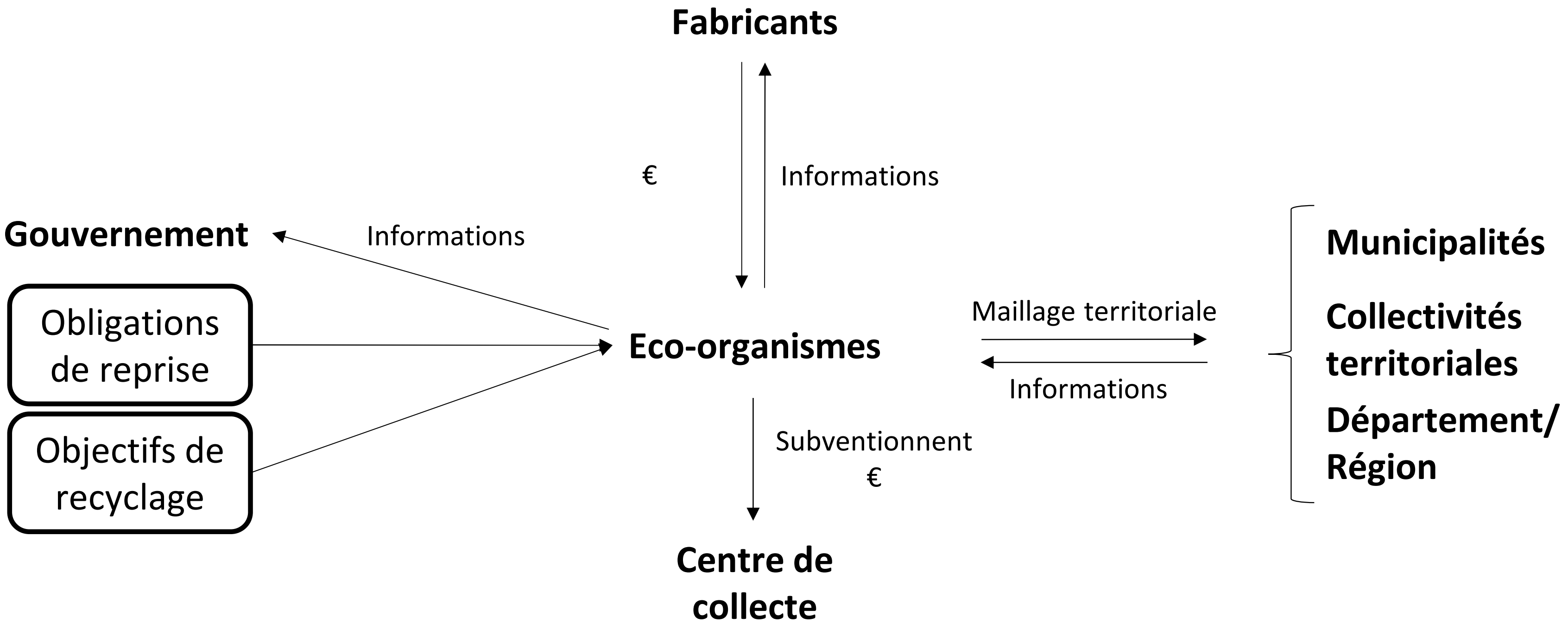
---

3 : LTECV, 2015-992 (2015). https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000031044385

4 : Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020. La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire

loi AGEC : REP PMCB

RESPONSABILITÉ ÉLARGIE DU PRODUCTEUR AUX PRODUITS ET MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION DU BÂTIMENT



Fabricants

€

Informations

Gouvernement

Informations

Obligations de reprise

Objectifs de recyclage

Eco-organismes

Maillage territoriale

Informations

Municipalités

Collectivités territoriales

Département/ Région

Subventionnent

€

Centre de collecte

loi AGEC : valorisations et PEMD

DÉFINITION ET HIÉRARCHISATION DES PROCÉDÉS DE TRAITEMENT DES PRODUITS, ÉQUIPEMENTS, MATÉRIAUX ET DÉCHETS DU BÂTIMENT

Chantier de déconstruction

Génère

Produits

Équipements

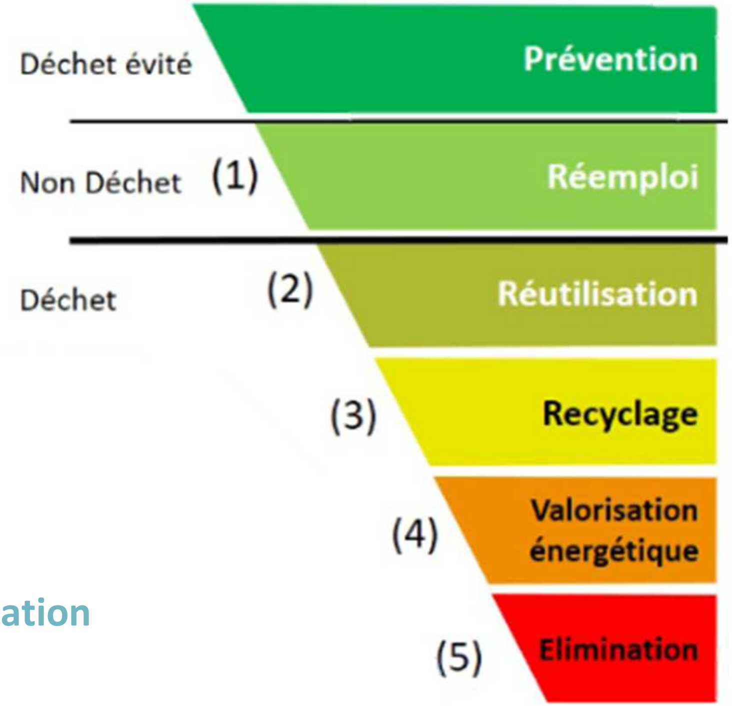
Matériaux

Déchets

Réemploi
< 1%

Recyclage
~33%

Décharge et incinération
~ 64 %


Déchet évité
Prévention
Non Déchet
(1)
Réemploi
Déchet
(2)
Réutilisation
(3)
Recyclage
(4)
Valorisation énergétique
(5)
Elimination

Difficultés des acteurs

LEVIERS ET FREINS IDENTIFIÉS

Connaissance des ressources territoriales[5]

Outils de pilotage simples

Indicateurs robustes et spécifiques[6]

Recensement et synergies des acteurs[5]

Attribution du foncier et logistique de l’EC[5]

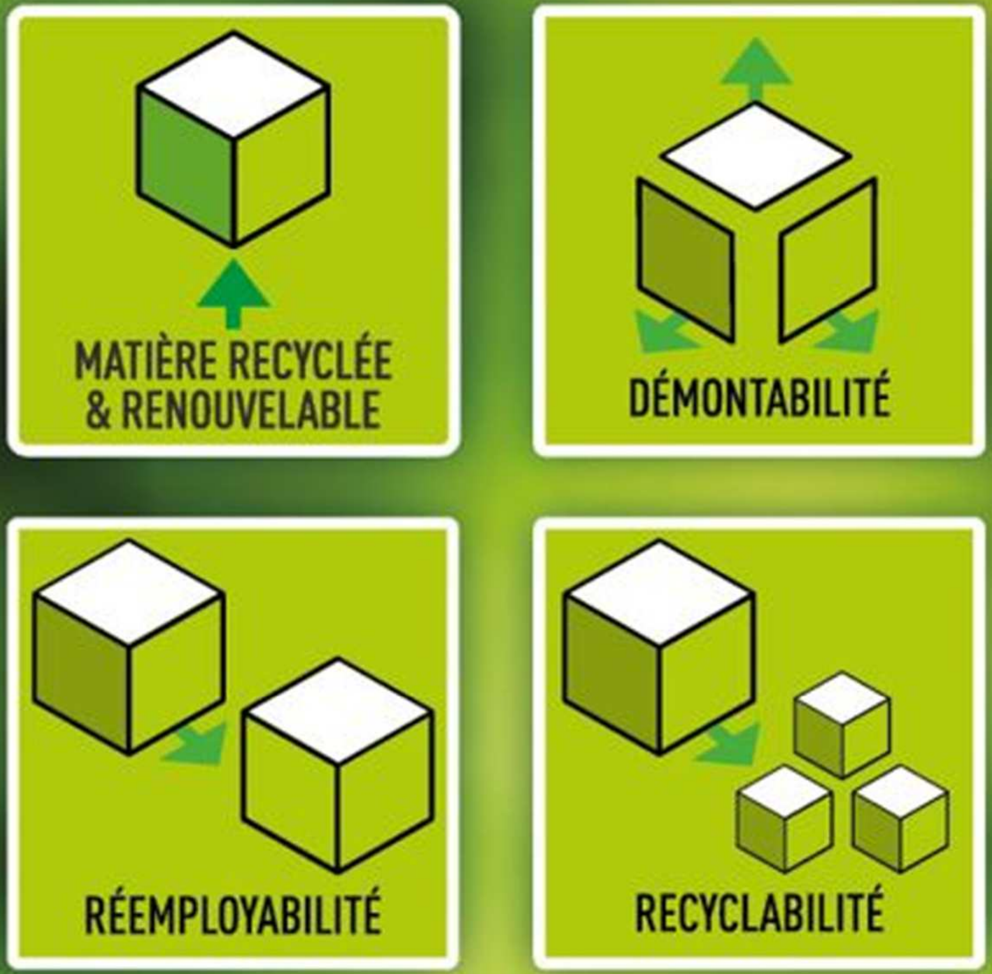
---

5 : Tirado, R., Aublet, A., Laurenceau, S., & Habert, G. (2022). Challenges and Opportunities for Circular Economy Promotion in the Building Sector.

6 : Bouillass, G., Saidani, M., Lameh, J., & Yannou, B. (2022). Digital Technologies to Advance Circular Economy at Territorial Level: Challenges and Solutions

02

Réemploi des matériaux de construction : Inventaire et nécessité d’un nouvel indicateur de circularité


MATIÈRE RECYCLÉE
& RENOUVELABLE
DÉMONTABILITÉ
RÉEMPLOYABILITÉ
RECYCLABILITÉ

Revue de littérature

MÉTHODOLOGIE

Sélection des papiers : requête scopus

Ecological Indicators 165 (2024) 112182

Contents lists available at ScienceDirect

Ecological Indicators

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolind

Review

Metrics in the circular economy: An inclusive research landscape of the thematic trends and future research agenda

recycling

Article

Circular Construction Indicator: Assessing Circularity in the Design, Construction, and End-of-Life Phase

Kostas Anastasiades *, Johan Blom and Amaryllis Audenaert

Journal of Cleaner Production 357 (2022) 131859

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

Critical review of nano and micro-level building circularity indicators and frameworks

Nouman Khadim[a], Rosa Agliata[a,*], Alfonso Marino[a], Muhammad Jamaluddin Thaheem[b], Luigi Mollo[a]

Analyse : Adaptation de la grille d'analyse d'indicateur proposée par Saidani et al.[7]

Phase du projet (construction, maintenance, déconstruction…)

Boucle de circularité (maintenance, réemploi, recyclage…)

Echelle (matière, produit, territoire…)

Acteurs visés (entreprises, maitrise d'œuvre, maitrise d'ouvrage…)

Type d'indicateur (impacts, performance)

7 : Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., Kendall, A., 2019. A taxonomy of circular economy indicators. Journal of Cleaner Production 207, 542–559. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.014.

Revue de littérature

LIMITATION DES INDICATEURS EXISTANTS

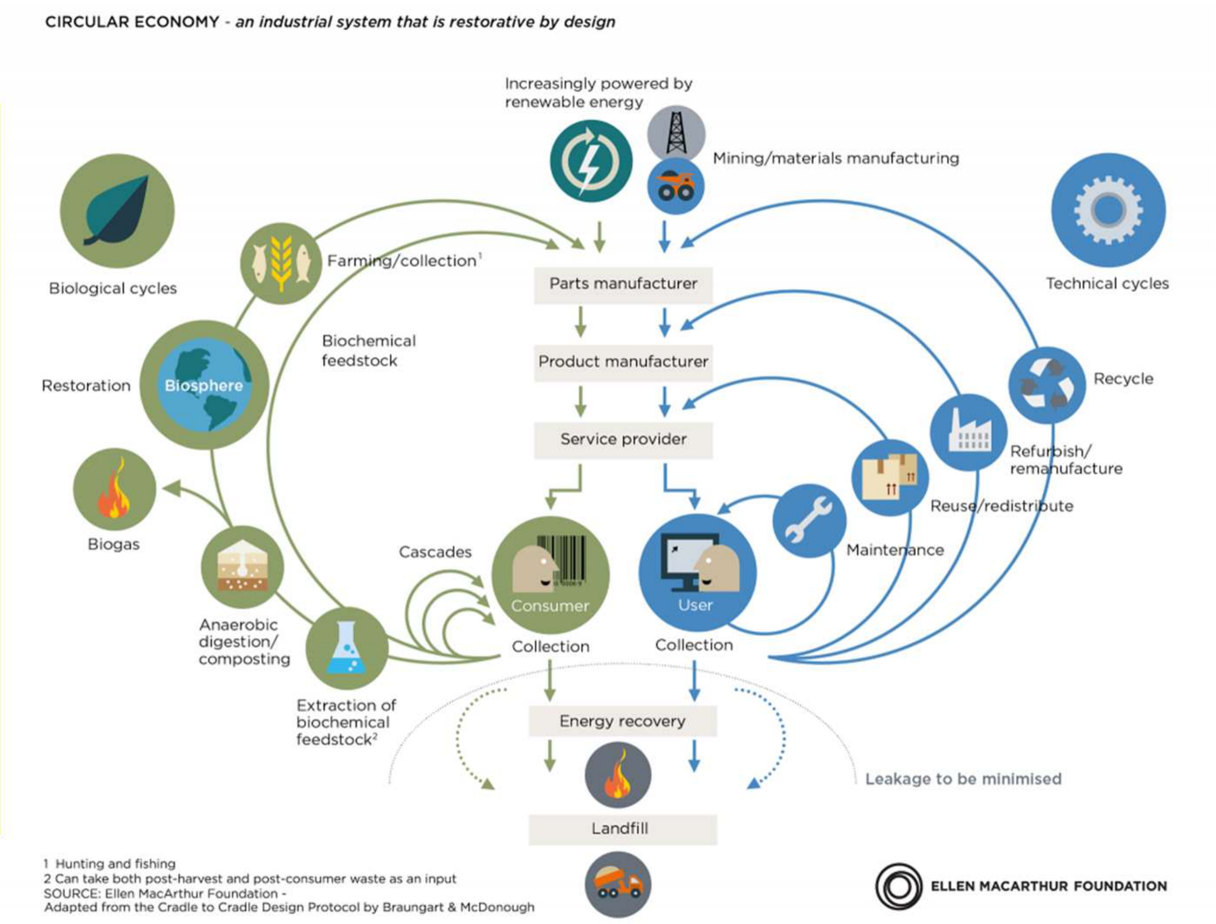
Réorganiser les savoirs actuels

Indicateur

- Spécifique au réemploi
- Différencie soutenabilité et circularité
- A l’échelle territoriale et holistique
- Prenne en compte le jeu d’acteur

03

Proposition d’un modèle de circularité et les indicateurs associés



CIRCULAR ECONOMY - *an industrial system that is restorative by design*

Increasingly powered by renewable energy
Mining/materials manufacturing
Biological cycles
Technical cycles
Farming/collection¹
Parts manufacturer
Biochemical feedstock
Product manufacturer
Restoration
Biosphere
Service provider
Recycle
Refurbish/remanufacture
Reuse/redistribute
Biogas
Maintenance
Cascades
Consumer
User
Anaerobic digestion/composting
Collection
Collection
Extraction of biochemical feedstock²
Energy recovery
Leakage to be minimised
Landfill
ELLEN MACARTHUR FOUNDATION

1 Hunting and fishing
2 Can take both post-harvest and post-consumer waste as an input
SOURCE: Ellen MacArthur Foundation - Adapted from the Cradle to Cradle Design Protocol by Braungart & McDonough

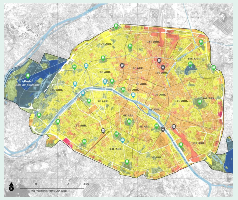
BTPFlux

UN MODÈLE D'ANALYSE DE FLUX DE MATIÈRE[8]

Utilise la base de données des bâtiments : inventaire des bâtiments en France

TyPy

Calcule la quantité de composant des bâtiments via TyPy



L'extrapole à l'échelle des territoires

---

[8] : Sorin, E., Tirado, R., Gully, E., Louërat, M., & Laurenceau, S. (2022). BTPFlux: A building material flow analysis model to enhance the urban metabolism on French territories. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1078(1), 012027. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012027M

Un modèle qui..

OBJECTIFS DU MODÈLE

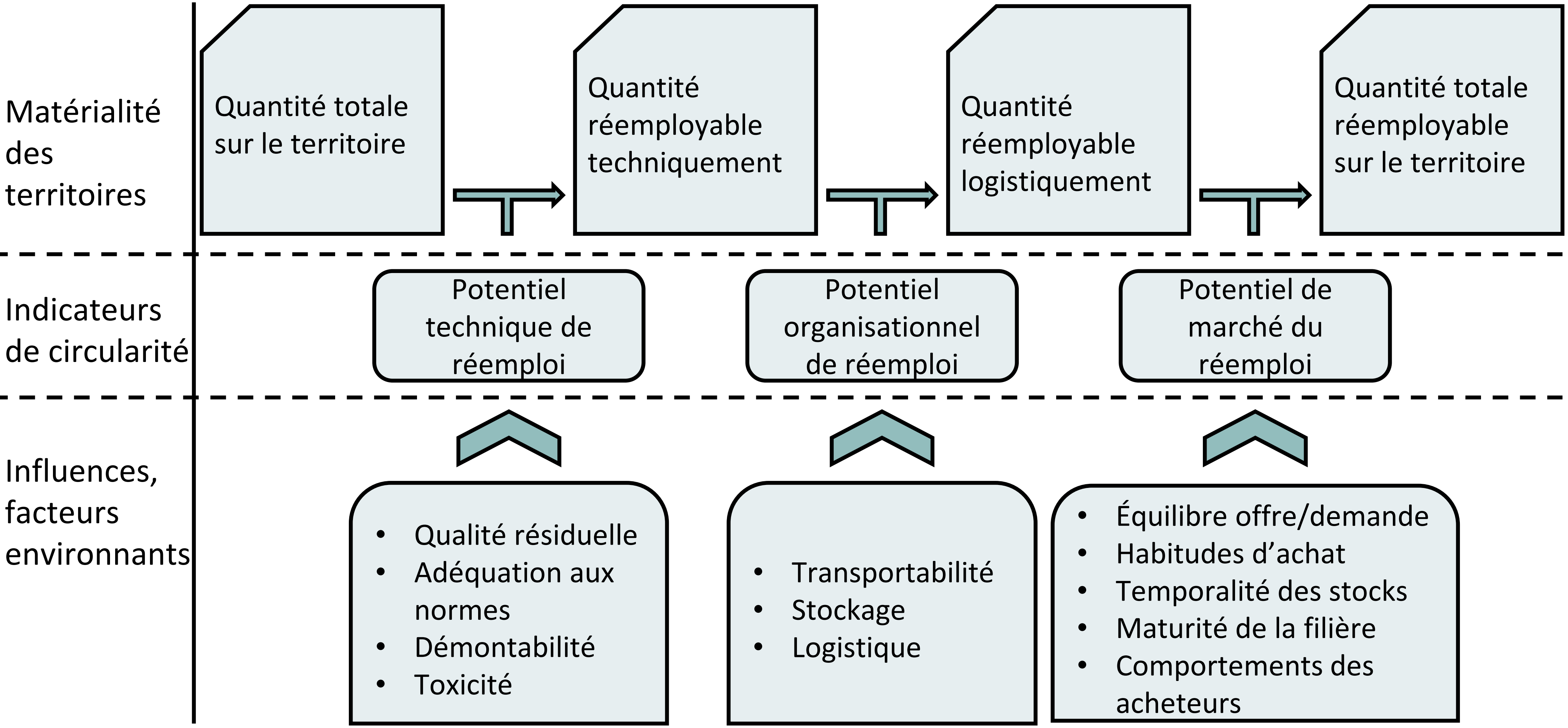
Permet de suivre le **cheminement** d’un composant jusqu’à son réemploi

Liste, organise et quantifie les différents **freins et leviers** pour plus de réemploi

Soit à la fois **évaluatif** (état des lieux) **prospectif** (scénarios et plans économie circulaire)

S’applique à un **territoire**

Modélisation de la boucle du réemploi



Matérialité des territoires

Quantité totale sur le territoire → Quantité réemployable techniquement → Quantité réemployable logistiquement → Quantité totale réemployable sur le territoire

Indicateurs de circularité

Potentiel technique de réemploi

Potentiel organisationnel de réemploi

Potentiel de marché du réemploi

Influences, facteurs environnants

- Qualité résiduelle
- Adéquation aux normes
- Démontabilité
- Toxicité

- Transportabilité
- Stockage
- Logistique

- Équilibre offre/demande
- Habitudes d'achat
- Temporalité des stocks
- Maturité de la filière
- Comportements des acheteurs

Prenons un peu de recul

CIRCULAR IT
LE NUMÉRIQUE AU SERVICE
DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Limitations actuelles

PISTES D'AMÉLIORATIONS DU MODÈLE

Réplicabilité au recyclage

Prise en compte de la phase amont (consommation)

Obtention des données

Prise en compte des acteurs territoriaux

Une circularité en fin de vie insuffisante

130Mt de matériaux de construction consommés par

Réemploi et recyclage ne sont pas des solutions **complètes et idéales**

Plafond de verre qu’il est important d’estimer

9 : Batizoom, Adème , 2024 : Chiffres clés - Introduction

Des circularités différentes

- Des circularités dans des contextes spécifiques avec des besoins spécifiques

Réduire la pression sur les ressources grâce à l'Economie Circulaire : le projet ABER

Sorin Edouard

CIRCULAR IT
LE NUMÉRIQUE AU SERVICE DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Enjeux

ANTICIPER LES BESOINS ET EVALUER LE POTENTIEL DU RÉEMPLOI ET DU RECYCLAGE POUR ASSURER UN APPROVISIONNEMENT DURABLE DES RESSOURCES DU SECTEUR DU BÂTIMENT

- Anticiper les flux de matières à venir
  - *Consommation de ressources*
  - *Potentiel de valorisation*

- Etablir des stratégies d’approvisionnement qui anticipent les crises et les tensions

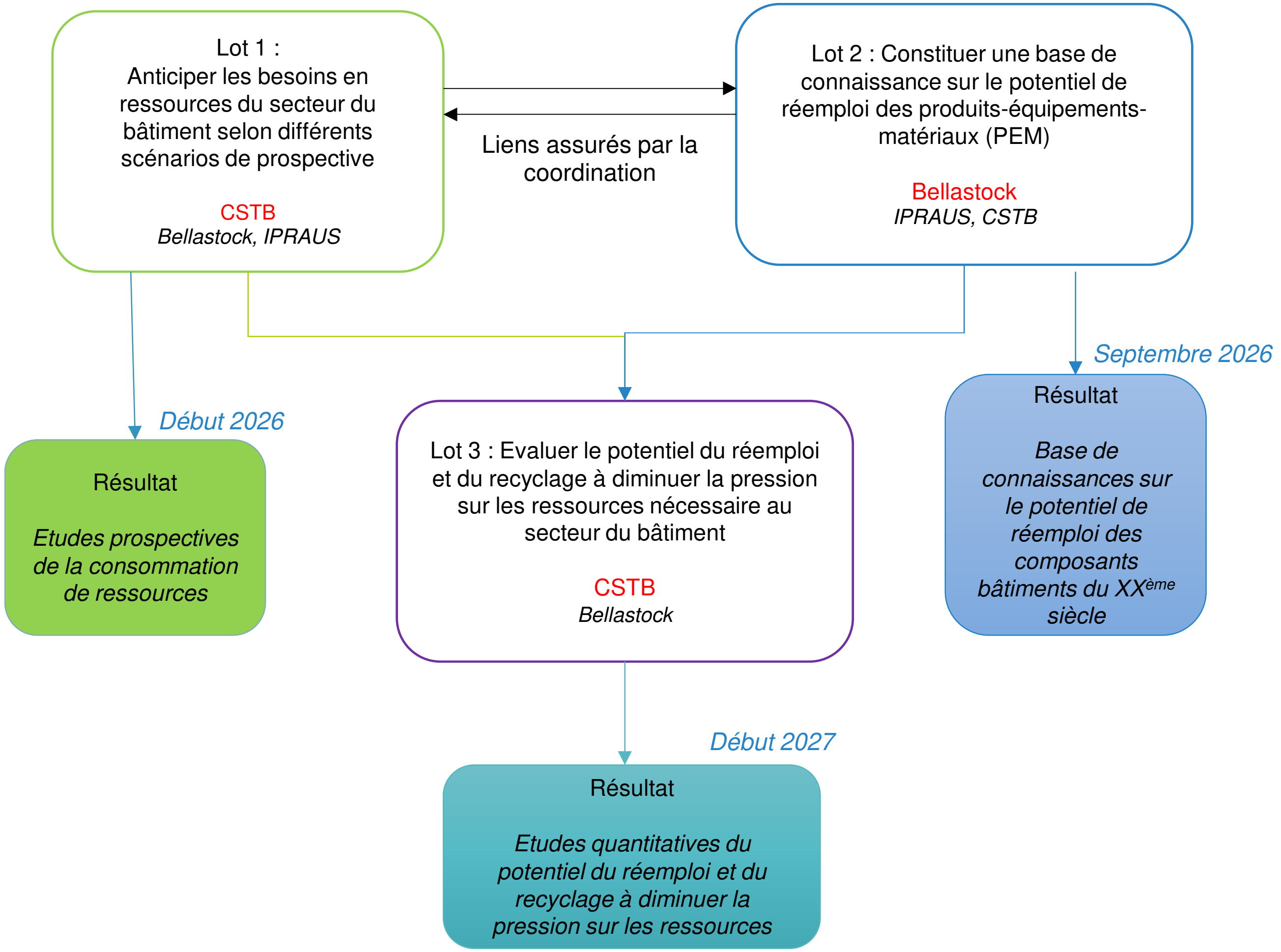
- Savoir prioriser les filières de valorisation des matières « critiques » ?

Objectifs du projet ABER

- Fournir de nouvelles connaissances
  - *Consommation de ressources*
  - *Potentiel de valorisation (réemploi particulièrement)*
  - *Capacité de la valorisation matière à réduire la pression sur les ressources*

- Développer des outils numériques mobilisables
  - *Base de connaissances sur le potentiel de réemploi (OPEN)*
  - *Modèle d'estimation de la matérialité des bâtiments (OPEN)*
  - *Modèle d'analyse des flux de matière*

Organisation du projet



Lot 1 :
Anticiper les besoins en ressources du secteur du bâtiment selon différents scénarios de prospective

CSTB
Bellastock, IPRAUS

Liens assurés par la coordination

Lot 2 : Constituer une base de connaissance sur le potentiel de réemploi des produits-équipements-matériaux (PEM)

Bellastock
IPRAUS, CSTB

Septembre 2026

Résultat

Base de connaissances sur le potentiel de réemploi des composants bâtiments du $XX^{ème}$ siècle

Début 2026

Résultat

Etudes prospectives de la consommation de ressources

Lot 3 : Evaluer le potentiel du réemploi et du recyclage à diminuer la pression sur les ressources nécessaire au secteur du bâtiment

CSTB
Bellastock

Début 2027

Résultat

Etudes quantitatives du potentiel du réemploi et du recyclage à diminuer la pression sur les ressources

CSTB (Coordinateur) :

- Expertise Prospective
- Expertise Ressources
- Expertise Modélisation
- Positionnement dans le secteur du bâtiment

Bellastock (Partenaire) :

- Expertise Réemploi
- Cogestion du site Opalis
- Dispose d'un grand nombre d'étude de terrain
- Positionnement au sein de la filière de réemploi

IPRAUS (Partenaire) :

- Expertise en Histoire de l'architecture
- Expertise dans l'Analyse d'archives
- Acteur académique

Comment modéliser ce potentiel ?

Les caractéristiques

- Plusieurs scénarios de prospective

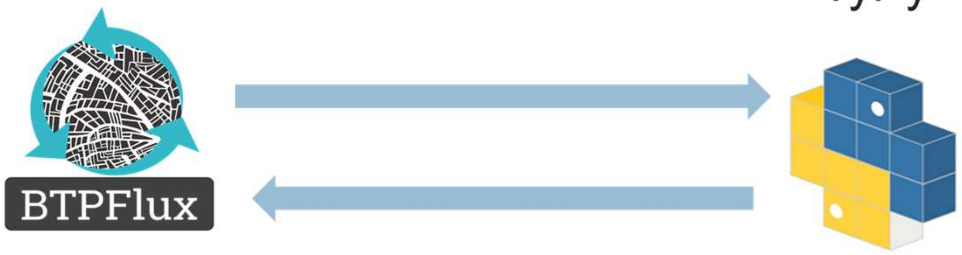
- Différents types de travaux :
  - Rénovation
  - Construction neuve

- Différentes typologies de bâtiments :
  - Logements individuels
  - Logements collectifs
  - Bureaux
  - Autres ?

- Territorialiser les flux :
  - Régions ou départements ?

- Focus sur certains PEM

Les moyens



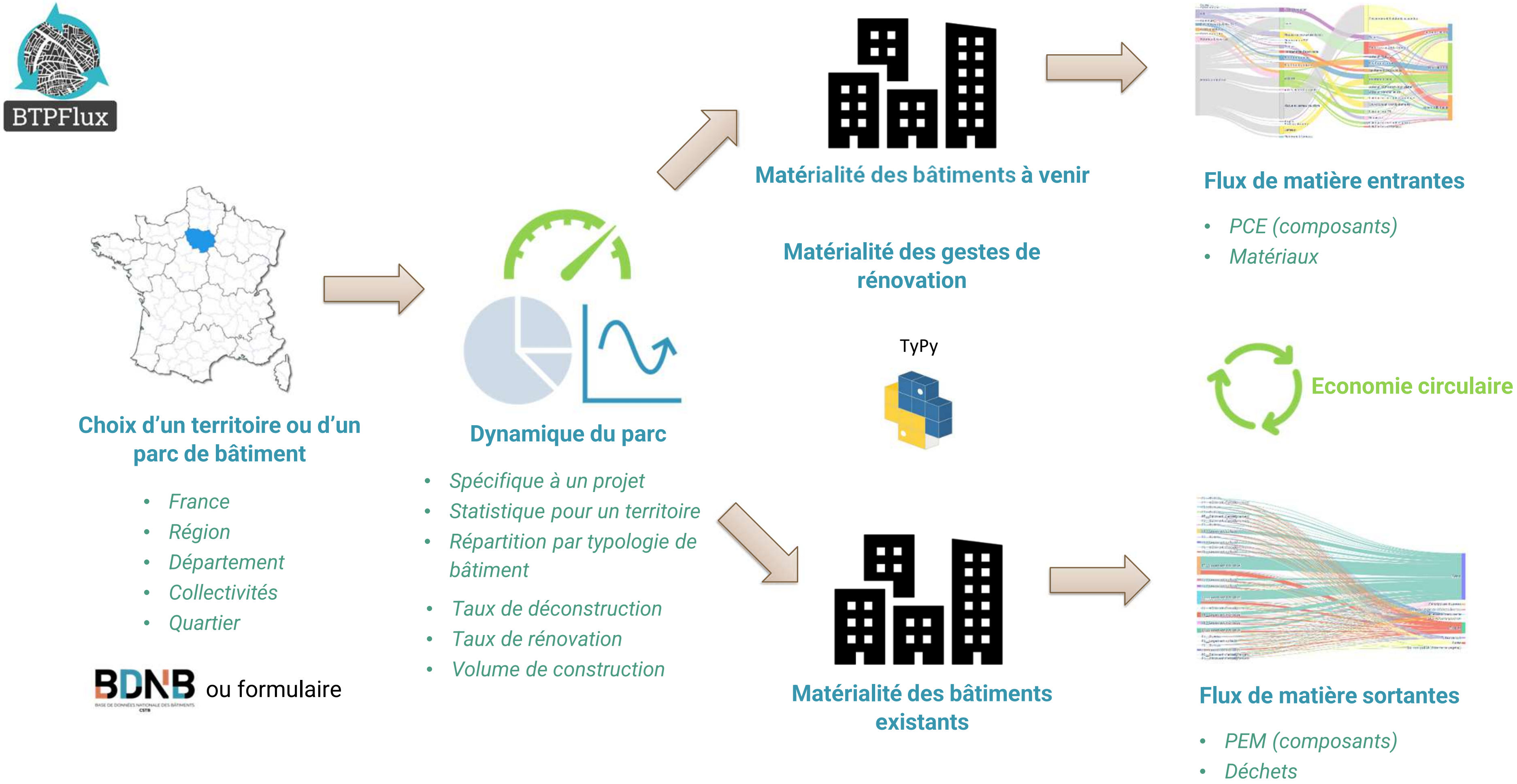
En adaptant des modèles existants

TyPy

Modélisation de la matérialité d'un ou plusieurs bâtiments

CSTB
le futur en construction

Structure du modèle BTPFlux



Choix d’un territoire ou d’un parc de bâtiment

- *France*
- *Région*
- *Département*
- *Collectivités*
- *Quartier*

BDNB ou formulaire

Dynamique du parc

- *Spécifique à un projet*
- *Statistique pour un territoire*
- *Répartition par typologie de bâtiment*

- *Taux de déconstruction*
- *Taux de rénovation*
- *Volume de construction*

Matérialité des bâtiments à venir

Matérialité des gestes de rénovation

TyPy

Matérialité des bâtiments existants

Flux de matière entrantes

- *PCE (composants)*
- *Matériaux*

Economie circulaire

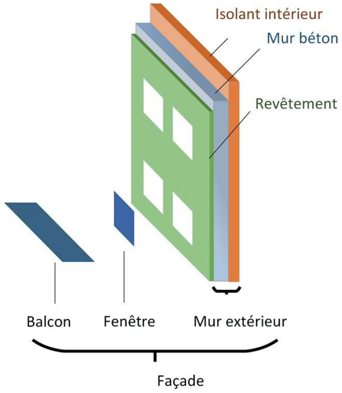
Flux de matière sortantes

- *PEM (composants)*
- *Déchets*

TyPy : Modéliser la matérialité

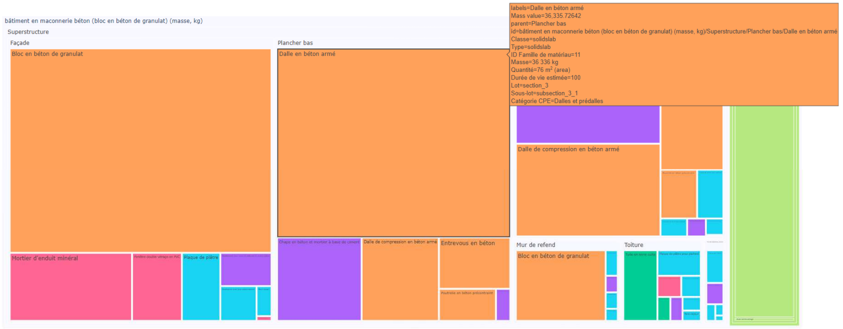
Métadonnées du bâtiment

- *Usage*
- *Période de construction*
- *Matériaux*
- *Géométrie*
- *…*


Isolant intérieur
Mur béton
Revêtement
Balcon
Fenêtre
Mur extérieur
Façade

Détermination des composants constitutifs du bâtiment

Base de données composants
~400 composants


bâtiment en maconnerie béton (bloc en béton de granulat) (masse, kg)
Superstructure
Façade
Bloc en béton de granulat
Mortier d'enduit minéral
Fenêtre double vitrage en PVC
Plaque de plâtre
Plancher bas
Dalle en béton armé
Chape en béton et mortier à base de ciment
Dalle de compression en béton armé
Entrevous en béton
Poutrelle en béton précontraint
Dalle de compression en béton armé
Mur de refend
Bloc en béton de granulat
Toiture
Tuile en terre cuite
Plaque de plâtre pour plafond

labels=Dalle en béton armé
Mass value=36,335.72642
parent=Plancher bas
id=bâtiment en maconnerie béton (bloc en béton de granulat) (masse, kg)/Superstructure/Plancher bas/Dalle en béton armé
Classe=solidslab
Type=solidslab
ID Famille de matériau=11
Masse=36 336 kg
Quantité=76 m² (area)
Durée de vie estimée=100
Lot=section_3
Sous-lot=subsection_3_1
Catégorie CPE=Dalles et prédalles

Estimation des quantités de composants du bâtiment

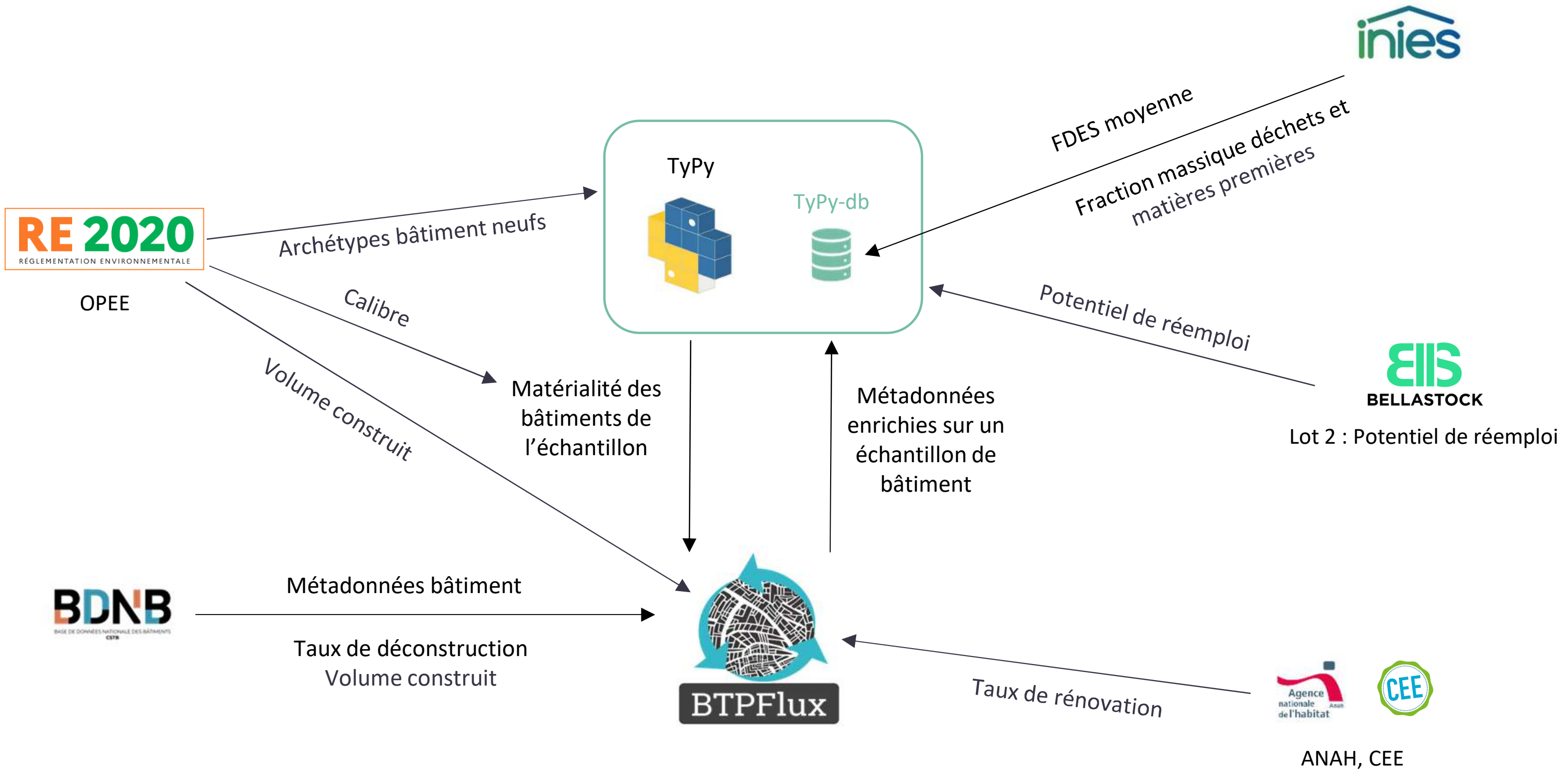
- *Algorithme de dimensionnement*
- *Utilisation de la géométrie*
- *Connaissances historiques*

Rénovation

Base de données de gestes de rénovation

- *Scénarios de rénovation*
- *Ajout/suppression de composants spécifiques*

Un écosystème numérique



TyPy

TyPy-db

OPEE

Archétypes bâtiment neufs

Calibre

Matérialité des bâtiments de l'échantillon

Volume construit

FDES moyenne

Fraction massique déchets et matières premières

Potentiel de réemploi

BELLASTOCK

Lot 2 : Potentiel de réemploi

Métadonnées enrichies sur un échantillon de bâtiment

Métadonnées bâtiment

Taux de déconstruction

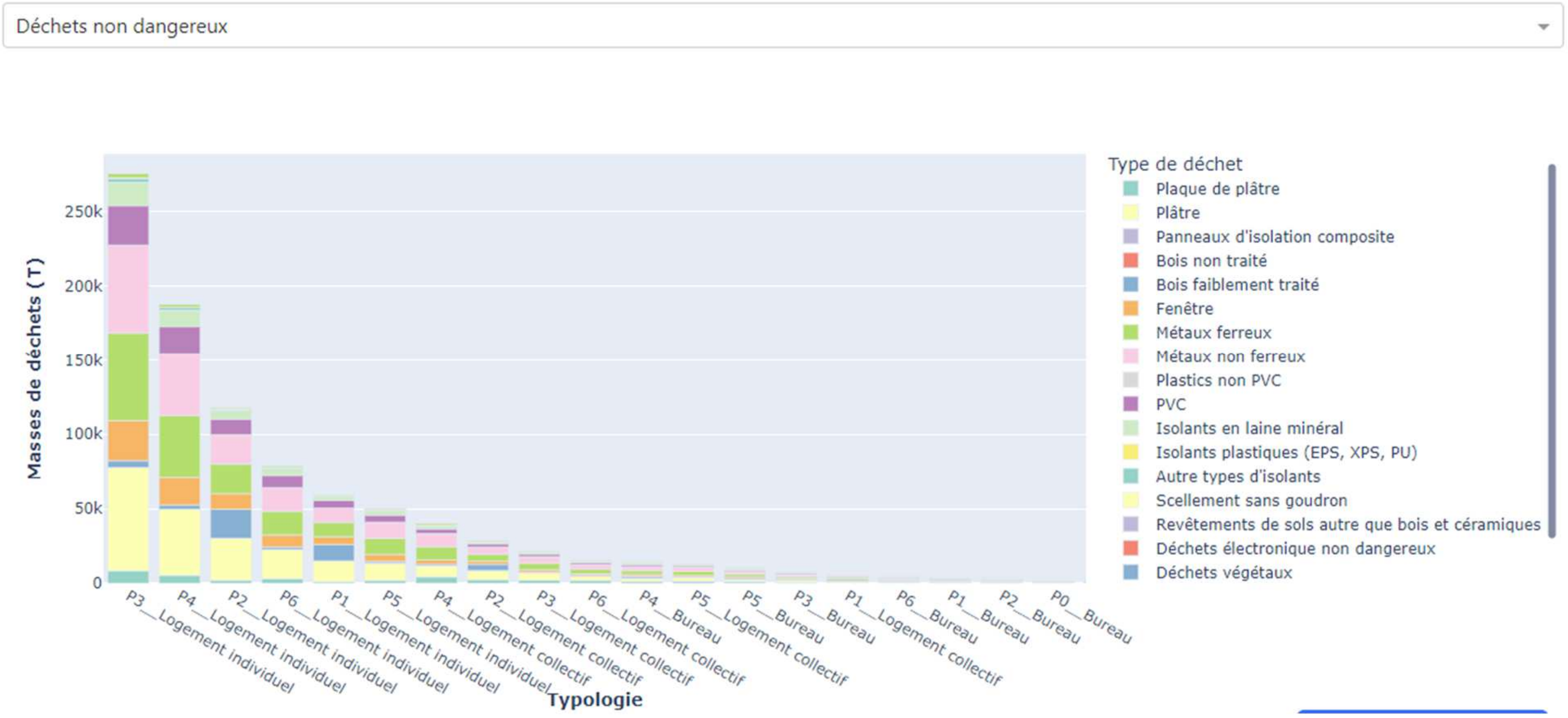
Volume construit

BTPFlux

Taux de rénovation

ANAH, CEE

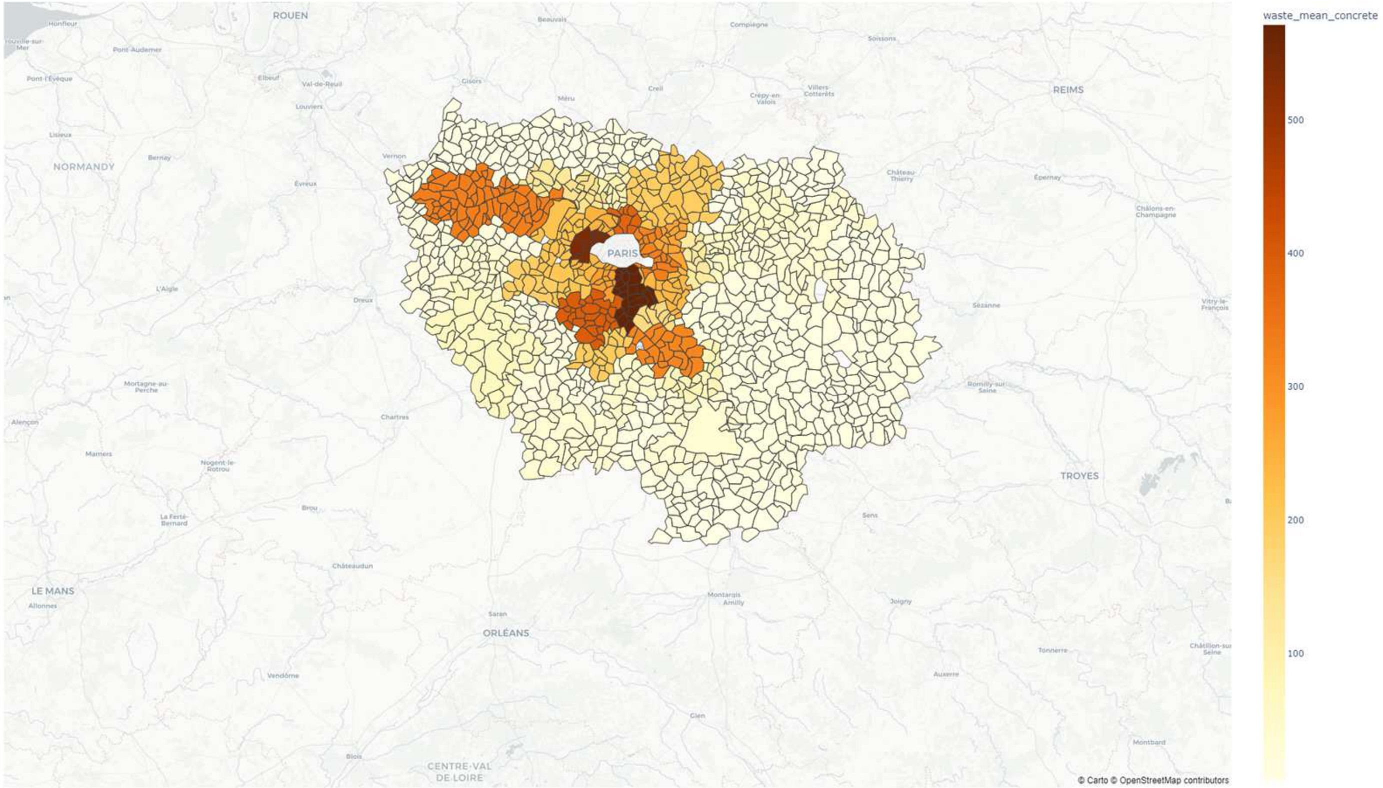
Exemple de résultat


Déchets non dangereux

Masses de déchets (T)
0
50k
100k
150k
200k
250k
Typologie
P3__Logement individuel
P4__Logement individuel
P2__Logement individuel
P6__Logement individuel
P1__Logement individuel
P5__Logement individuel
P4__Logement collectif
P2__Logement collectif
P3__Logement collectif
P6__Logement collectif
P4__Bureau
P5__Logement collectif
P5__Bureau
P3__Bureau
P1__Logement collectif
P6__Bureau
P1__Bureau
P2__Bureau
P0__Bureau
Type de déchet
Plaque de plâtre
Plâtre
Panneaux d'isolation composite
Bois non traité
Bois faiblement traité
Fenêtre
Métaux ferreux
Métaux non ferreux
Plastics non PVC
PVC
Isolants en laine minéral
Isolants plastiques (EPS, XPS, PU)
Autre types d'isolants
Scellement sans goudron
Revêtements de sols autre que bois et céramiques
Déchets électronique non dangereux
Déchets végétaux

Quantité de déchets par catégorie et par typologie de bâtiment

Exemple de résultat


waste_mean_concrete
500
400
300
200
100
PARIS
ROUEN
REIMS
NORMANDY
TROYES
LE MANS
ORLEANS
CENTRE-VAL DE LOIRE
© Carto © OpenStreetMap contributors

Quantité de déchets de béton produit chaque année par EPCI/EPT en kTonnes

Exemple de résultat

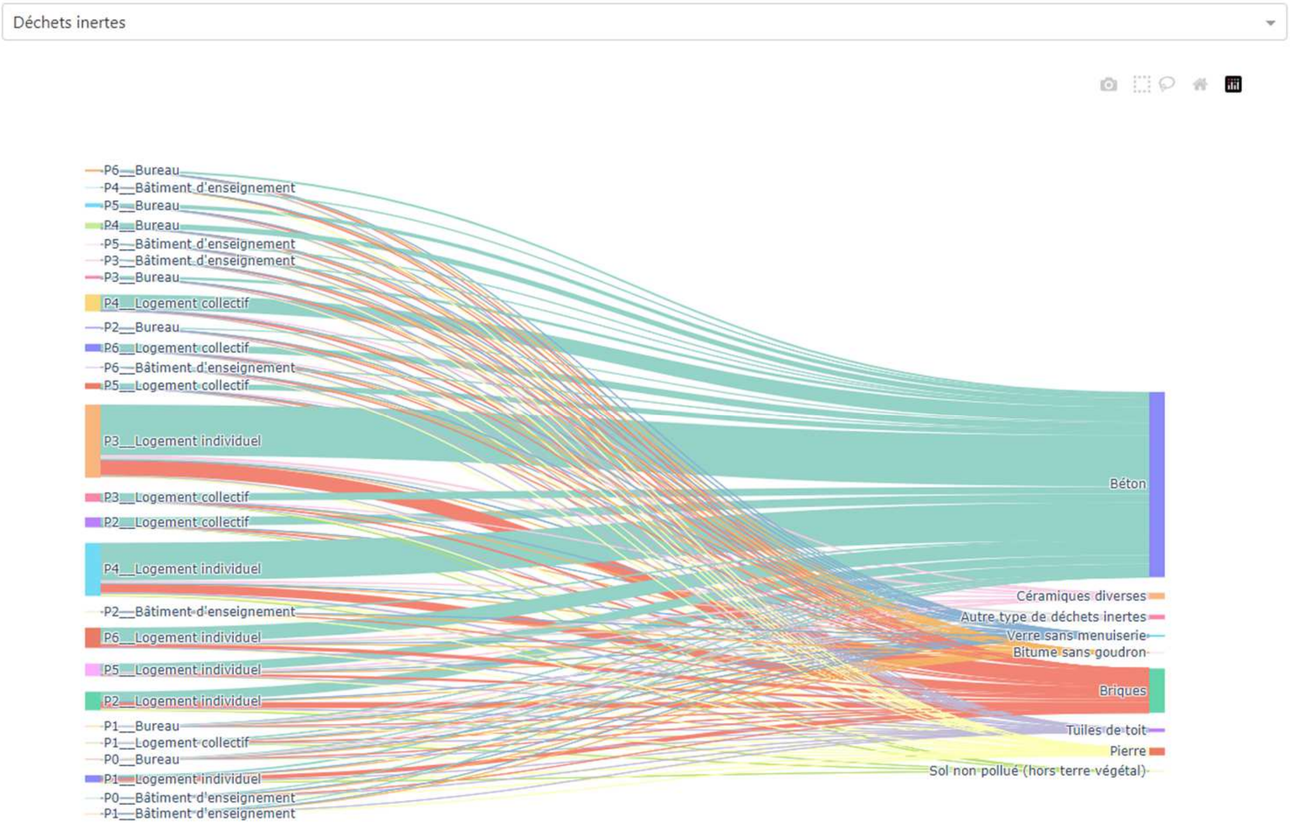

Déchets inertes
P6__Bureau
P4__Bâtiment d'enseignement
P5__Bureau
P4__Bureau
P5__Bâtiment d'enseignement
P3__Bâtiment d'enseignement
P3__Bureau
P4__Logement collectif
P2__Bureau
P6__Logement collectif
P6__Bâtiment d'enseignement
P5__Logement collectif
P3__Logement individuel
P3__Logement collectif
P2__Logement collectif
P4__Logement individuel
P2__Bâtiment d'enseignement
P6__Logement individuel
P5__Logement individuel
P2__Logement individuel
P1__Bureau
P1__Logement collectif
P0__Bureau
P1__Logement individuel
P0__Bâtiment d'enseignement
P1__Bâtiment d'enseignement
Béton
Céramiques diverses
Autre type de déchets inertes
Verre sans menuiserie
Bitume sans goudron
Briques
Tuiles de toit
Pierre
Sol non pollué (hors terre végétal)

Diagramme de Sankey des flux de déchets
Typologie de bâtiment -> Type de déchets

Conclusion

- Développement de solutions numériques
    - *Modélisation des flux de matière entrants et sortants*
    - *Modélisation du potentiel de la valorisation matière*
    - *Trajectoire prospective à horizon 2050*
    - *Base de connaissance sur le réemploi*

- Nouvelles connaissances
    - *Correspondance entre les nomenclatures PEMD/PMCB/RE2020*
    - *Modélisation d'archétypes de bâtiment*
    - *Lien entre archétype de bâtiment et potentiel de réemploi de PEM*

The potential for Ukraine's circular post-disaster recovery

Tetiana Shevchenko
Assoc. Prof., Ph.D.
Sumy, Ukraine
SAFE Fellowship Awardee
Senior Researcher at the LGI
CentraleSupélec, Université Paris-Saclay,
Gif-sur-Yvette, France

CIRCULAR IT
LE NUMÉRIQUE AU SERVICE
DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

1. SAFE project

About project

Funded by
the European Union

SAFE – **S**upporting **A**t-risk researchers with **F**ellowships in **E**urope

https://saferesearchers.eu/

Project title: *"The framework for circular and climate-neutral post-disaster reconstruction: the case of Ukraine“*

Abbreviation: *CRebuild4P-D*

General objective:

The CRebuild4P-D project aims at developing and deploying a generic framework for the circular and climate-neutral reconstruction of a post-disaster territory and, on its basis, proposing a Strategy for reconstruction of post-war Ukraine to facilitate the recovery of regions by circular construction initiatives towards carbon-neutral Europe.

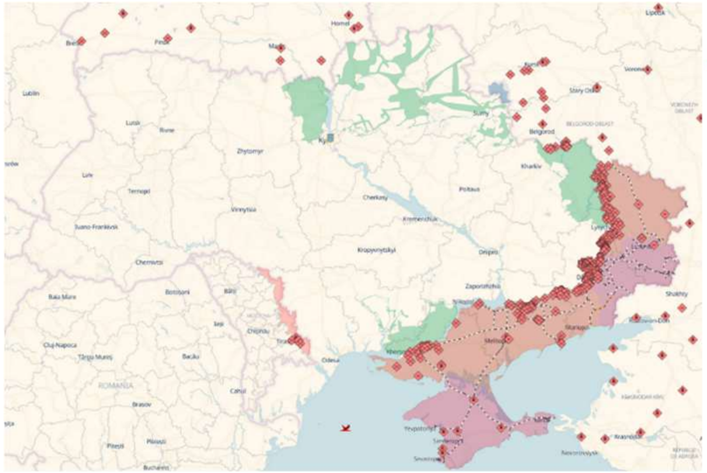
Host university/department: CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, LGI

Supervisor: Prof. Bernard Yannou

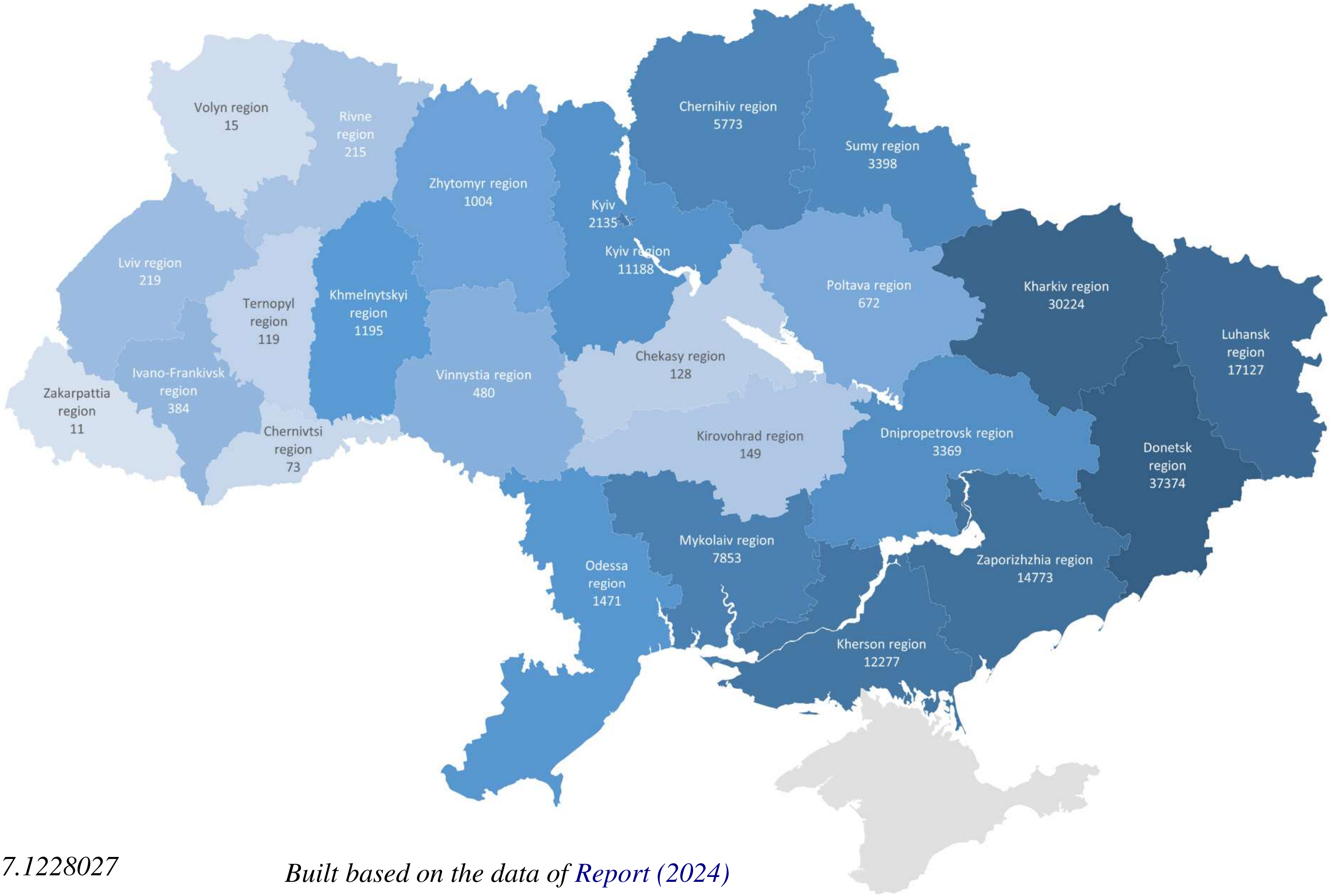
Duration: *24 months*

2. Ukraine at War: An overview

Total economic damage by regions of Ukraine in the beginning of 2024, million US dollars



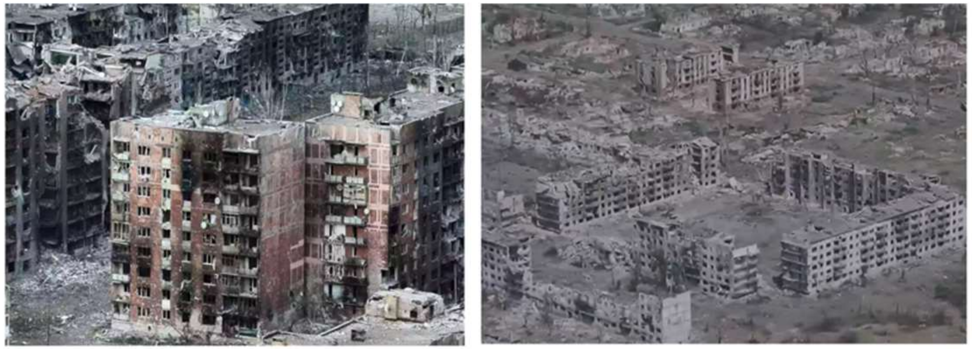
Deep State MAP, https://deepstatemap.live/en#7/49.1635490/37.1228027


Volyn region
15
Rivne region
215
Zhytomyr region
1004
Kyiv
2135
Chernihiv region
5773
Sumy region
3398
Lviv region
219
Ternopyl region
119
Khmelnytskyi region
1195
Kyiv region
11188
Poltava region
672
Kharkiv region
30224
Luhansk region
17127
Zakarpattia region
11
Ivano-Frankivsk region
384
Chernivtsi region
73
Vinnystia region
480
Chekasy region
128
Kirovohrad region
149
Dnipropetrovsk region
3369
Donetsk region
37374
Odessa region
1471
Mykolaiv region
7853
Zaporizhzhia region
14773
Kherson region
12277

Built based on the data of Report (2024)

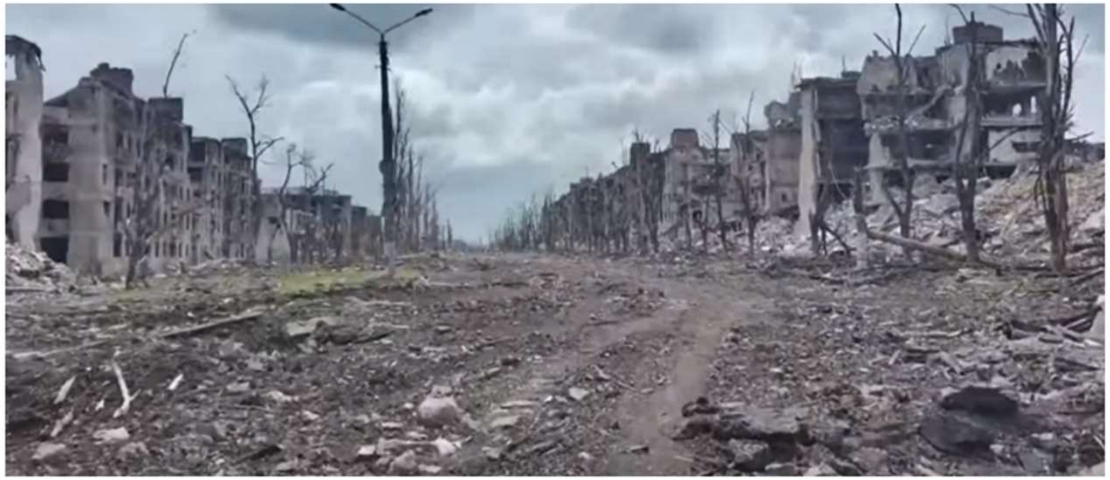
2. Ukraine at War: An overview

Scale and degree of destruction



(a) Bakhmut, Donetsk region, May 2023
Retrieved from New York Times (2023)

(b) Chasiv Yar, Donetsk region, August 2024
Retrieved from Ukrinform (2024)

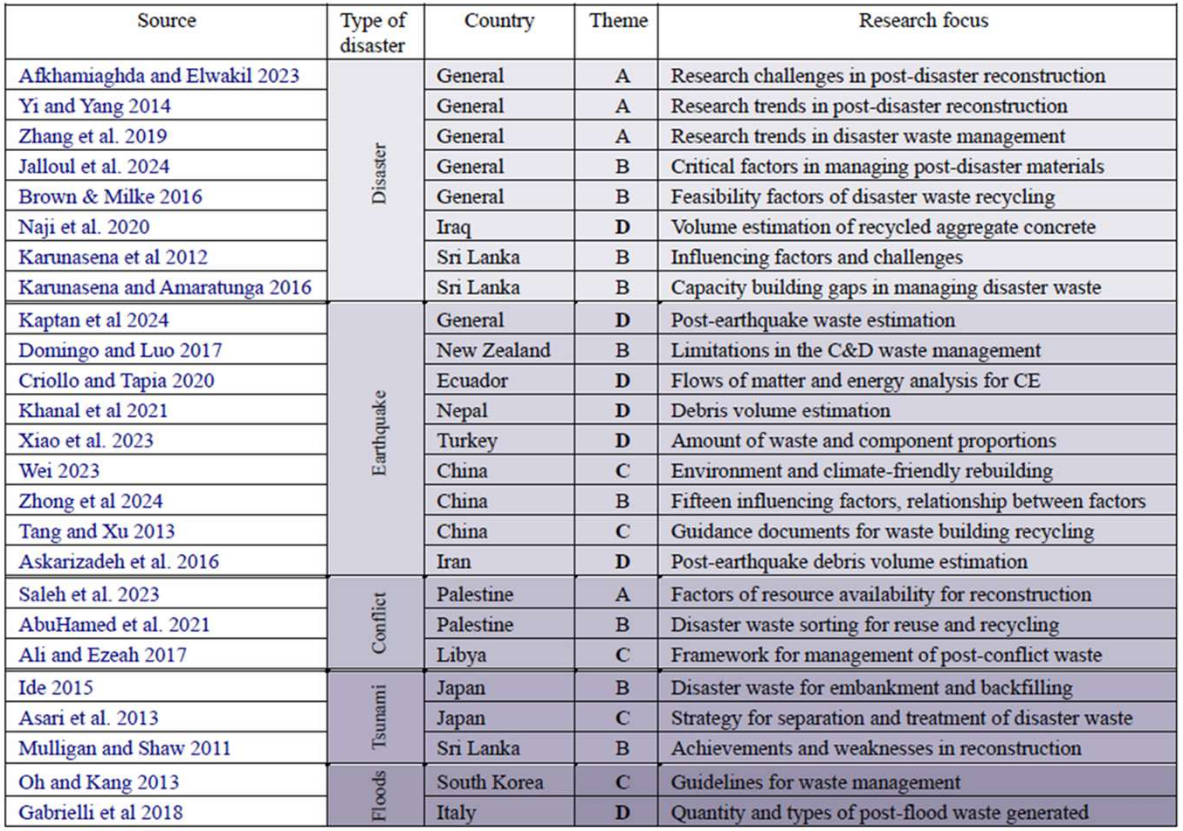


(c) Bakhmut, Donetsk region, July 2023. *Retrieved from Official Bakhmut (2023)*

3. Framework of circular recovery

Circular post-disaster reconstruction: An emerging field?

Table 1. Mapping of publications on disaster recovery with a focus on CE aspects



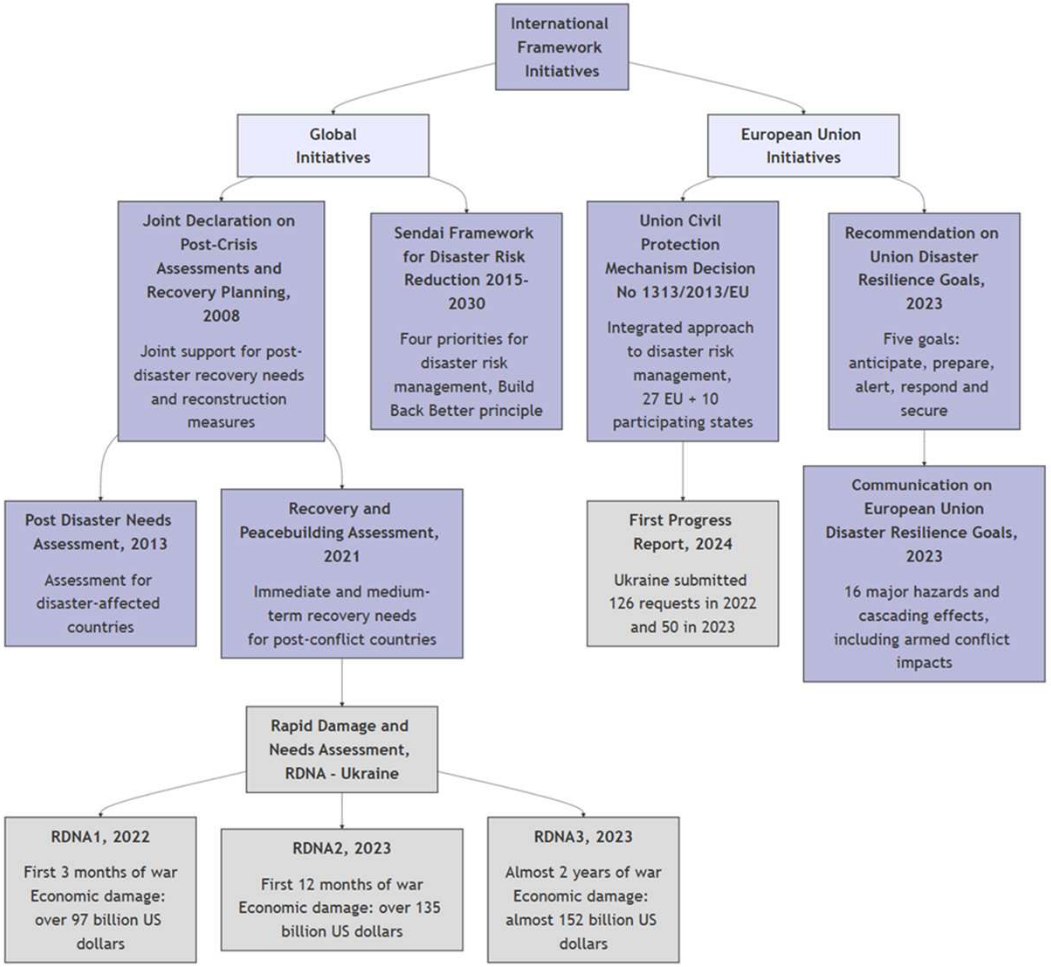
Source	Type of disaster	Country	Theme	Research focus
Afkhamiaghda and Elwakil 2023	Disaster	General	A	Research challenges in post-disaster reconstruction
Yi and Yang 2014		General	A	Research trends in post-disaster reconstruction
Zhang et al. 2019		General	A	Research trends in disaster waste management
Jalloul et al. 2024		General	B	Critical factors in managing post-disaster materials
Brown & Milke 2016		General	B	Feasibility factors of disaster waste recycling
Naji et al. 2020		Iraq	D	Volume estimation of recycled aggregate concrete
Karunasena et al 2012		Sri Lanka	B	Influencing factors and challenges
Karunasena and Amaratunga 2016		Sri Lanka	B	Capacity building gaps in managing disaster waste
Kaptan et al 2024	Earthquake	General	D	Post-earthquake waste estimation
Domingo and Luo 2017		New Zealand	B	Limitations in the C&D waste management
Criollo and Tapia 2020		Ecuador	D	Flows of matter and energy analysis for CE
Khanal et al 2021		Nepal	D	Debris volume estimation
Xiao et al. 2023		Turkey	D	Amount of waste and component proportions
Wei 2023		China	C	Environment and climate-friendly rebuilding
Zhong et al 2024		China	B	Fifteen influencing factors, relationship between factors
Tang and Xu 2013		China	C	Guidance documents for waste building recycling
Askarizadeh et al. 2016		Iran	D	Post-earthquake debris volume estimation
Saleh et al. 2023	Conflict	Palestine	A	Factors of resource availability for reconstruction
AbuHamed et al. 2021		Palestine	B	Disaster waste sorting for reuse and recycling
Ali and Ezeah 2017		Libya	C	Framework for management of post-conflict waste
Ide 2015	Tsunami	Japan	B	Disaster waste for embankment and backfilling
Asari et al. 2013		Japan	C	Strategy for separation and treatment of disaster waste
Mulligan and Shaw 2011		Sri Lanka	B	Achievements and weaknesses in reconstruction
Oh and Kang 2013	Floods	South Korea	C	Guidelines for waste management
Gabrielli et al 2018		Italy	D	Quantity and types of post-flood waste generated

A, B, C, D – themes in the field.

***Source**: T. Shevchenko, B. Yannou, M. Saidani, Dallas, Texas, USA, 11-14 August 2025*

3. Framework of circular recovery

Global initiatives and EU supportive initiatives for Ukraine



International Framework Initiatives

Global Initiatives

Joint Declaration on Post-Crisis Assessments and Recovery Planning, 2008

Joint support for post-disaster recovery needs and reconstruction measures

Post Disaster Needs Assessment, 2013

Assessment for disaster-affected countries

Recovery and Peacebuilding Assessment, 2021

Immediate and medium-term recovery needs for post-conflict countries

Rapid Damage and Needs Assessment, RDNA - Ukraine

RDNA1, 2022

First 3 months of war
Economic damage: over 97 billion US dollars

RDNA2, 2023

First 12 months of war
Economic damage: over 135 billion US dollars

RDNA3, 2023

Almost 2 years of war
Economic damage: almost 152 billion US dollars

Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030

Four priorities for disaster risk management, Build Back Better principle

European Union Initiatives

Union Civil Protection Mechanism Decision No 1313/2013/EU

Integrated approach to disaster risk management, 27 EU + 10 participating states

First Progress Report, 2024

Ukraine submitted 126 requests in 2022 and 50 in 2023

Recommendation on Union Disaster Resilience Goals, 2023

Five goals: anticipate, prepare, alert, respond and secure

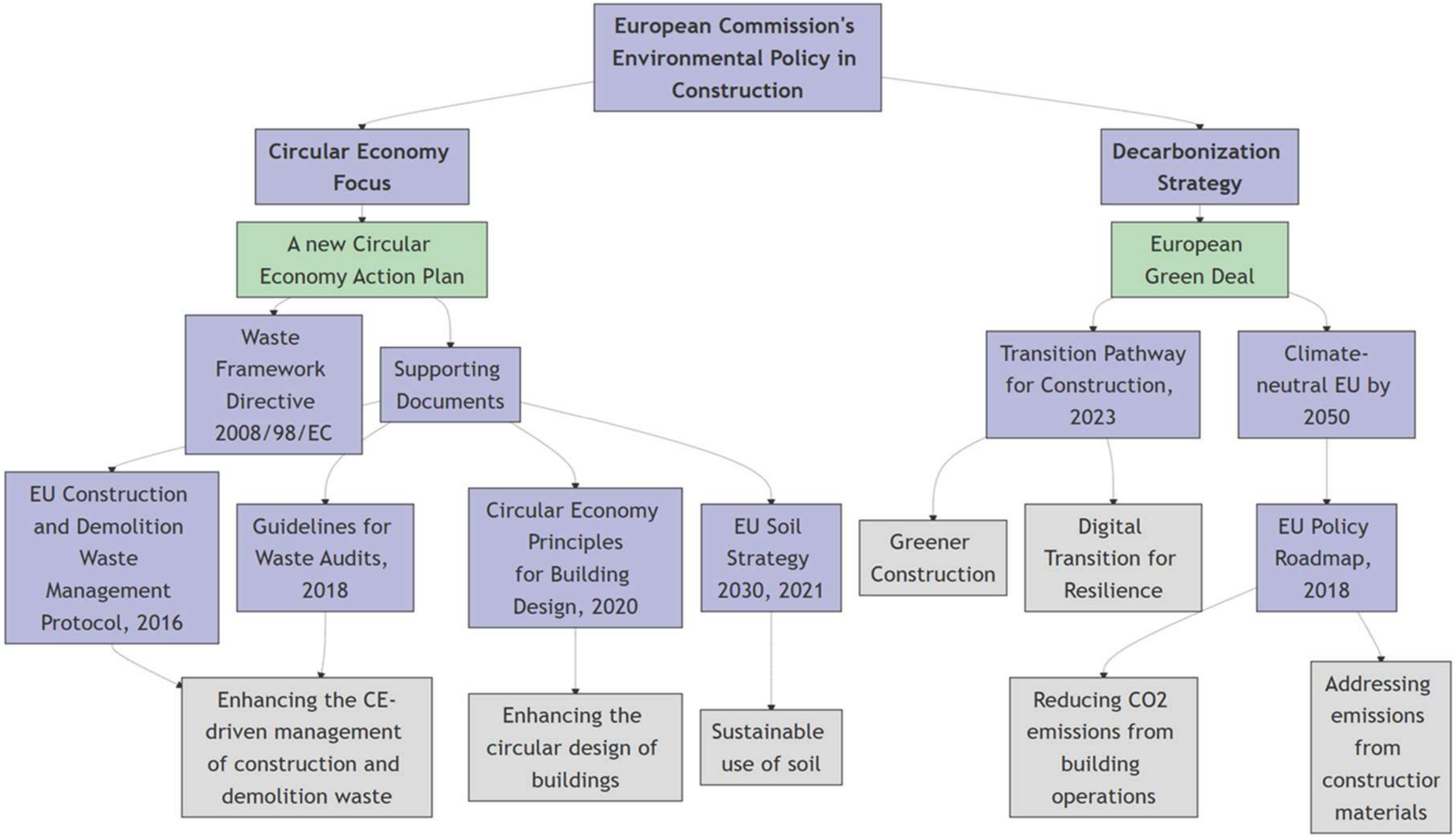
Communication on European Union Disaster Resilience Goals, 2023

16 major hazards and cascading effects, including armed conflict impacts

Source: *T. Shevchenko, S. Çetin, B. Yannou, Y. Kirchherr et al. (2025), JCLEPRO-D-25-12225*

3. Framework of circular recovery

Ukraine's potential for circular recovery



European Commission's Environmental Policy in Construction

Circular Economy Focus

A new Circular Economy Action Plan

Waste Framework Directive 2008/98/EC

Supporting Documents

EU Construction and Demolition Waste Management Protocol, 2016

Guidelines for Waste Audits, 2018

Circular Economy Principles for Building Design, 2020

EU Soil Strategy 2030, 2021

Enhancing the CE-driven management of construction and demolition waste

Enhancing the circular design of buildings

Sustainable use of soil

Decarbonization Strategy

European Green Deal

Transition Pathway for Construction, 2023

Climate-neutral EU by 2050

Greener Construction

Digital Transition for Resilience

EU Policy Roadmap, 2018

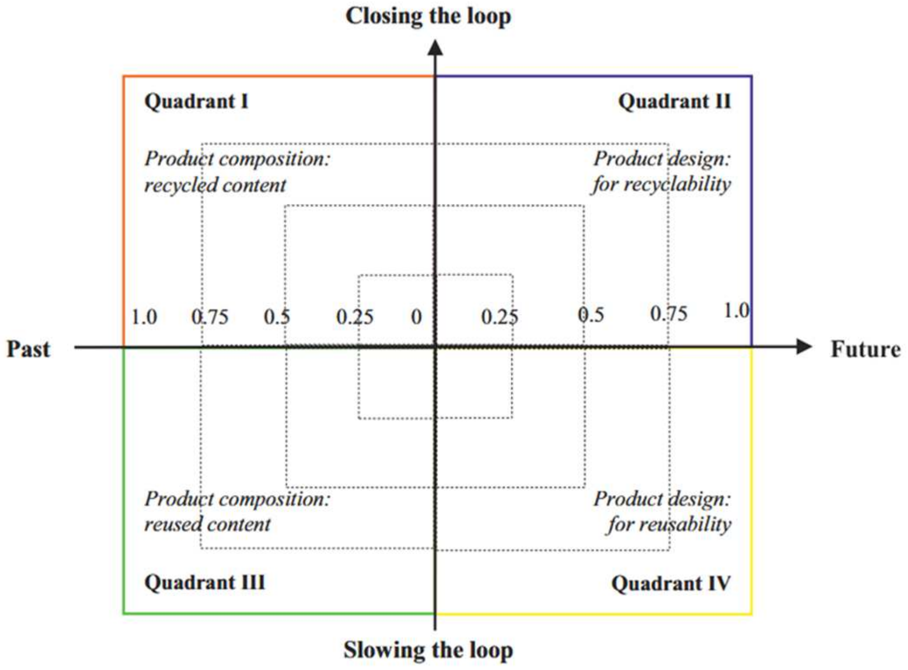
Reducing CO2 emissions from building operations

Addressing emissions from construction materials

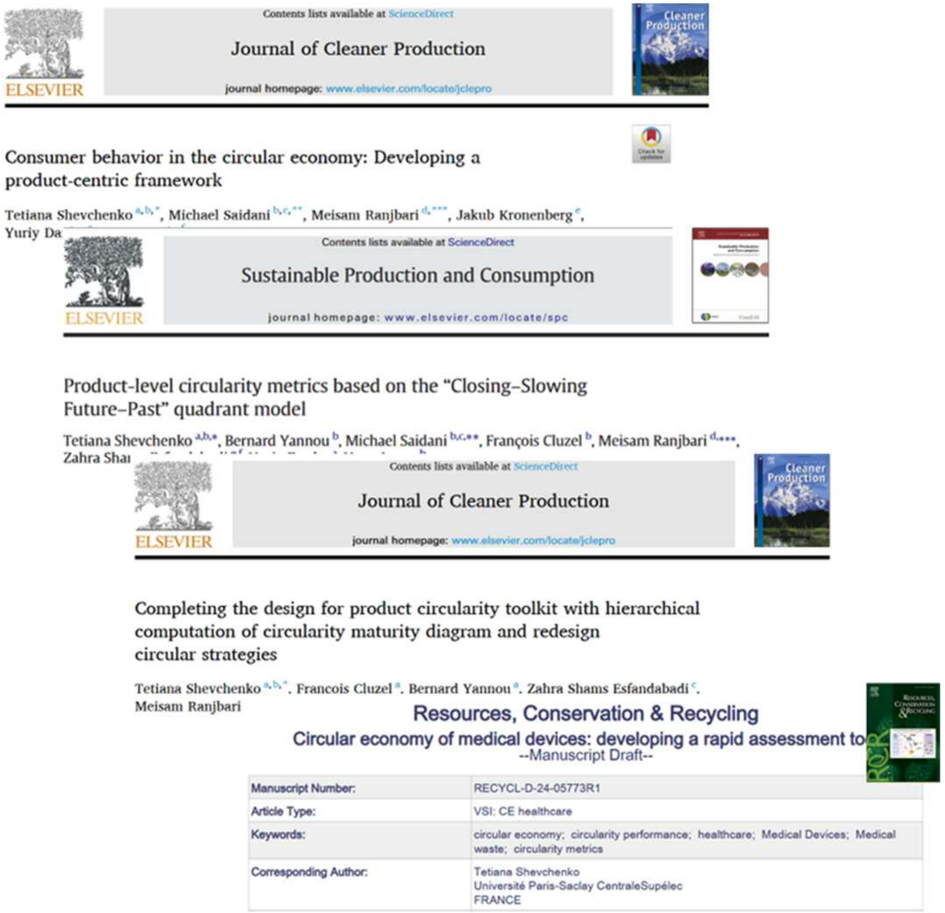
Source: *T. Shevchenko, S. Çetin, B. Yannou, Y. Kirchherr et al. (2025), JCLEPRO-D-25-12225*

3. Framework of circular recovery

"Closing-Slowing Future-Past" quadrant model


Closing the loop
Quadrant I
Quadrant II
Product composition:
recycled content
Product design:
for recyclability
1.0
0.75
0.5
0.25
0
0.25
0.5
0.75
1.0
Past
Future
Product composition:
reused content
Product design:
for reusability
Quadrant III
Quadrant IV
Slowing the loop

Source: *T. Shevchenko B. Yannou, M. Saidani et al. (2022)*



Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

Consumer behavior in the circular economy: Developing a product-centric framework

Tetiana Shevchenko [a,b,*], Michael Saidani [b,c,**], Meisam Ranjbari [d,***], Jakub Kronenberg [e],
Yuriy Da

Contents lists available at ScienceDirect

Sustainable Production and Consumption

journal homepage: www.elsevier.com/locate/spc

Product-level circularity metrics based on the "Closing–Slowing Future–Past" quadrant model

Tetiana Shevchenko [a,b,*], Bernard Yannou [b], Michael Saidani [b,c,**], François Cluzel [b], Meisam Ranjbari [d,***],
Zahra Sha

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

Completing the design for product circularity toolkit with hierarchical computation of circularity maturity diagram and redesign circular strategies

Tetiana Shevchenko [a,b,*], Francois Cluzel [a], Bernard Yannou [a], Zahra Shams Esfandabadi [c],
Meisam Ranjbari

Resources, Conservation & Recycling

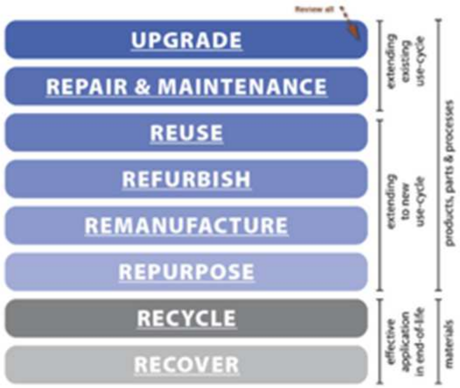
Circular economy of medical devices: developing a rapid assessment to

--Manuscript Draft--

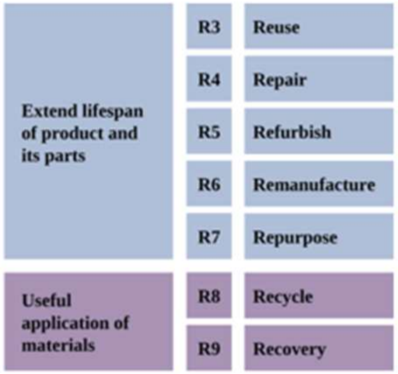
Manuscript Number:	RECYCL-D-24-05773R1
Article Type:	VSI: CE healthcare
Keywords:	circular economy; circularity performance; healthcare; Medical Devices; Medical waste; circularity metrics
Corresponding Author:	Tetiana Shevchenko Université Paris-Saclay CentraleSupélec FRANCE

3. Framework of circular recovery

Dual hierarchy of circular strategies

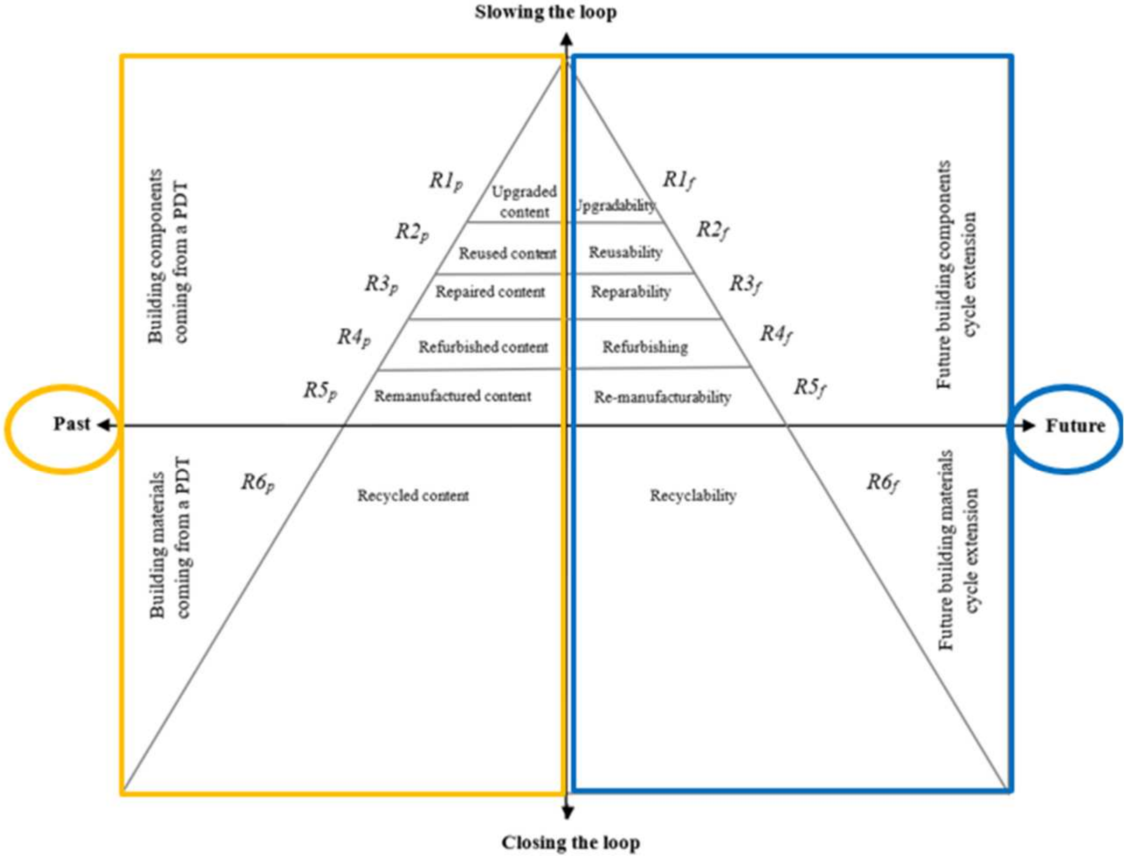

Review all
UPGRADE
REPAIR & MAINTENANCE
REUSE
REFURBISH
REMANUFACTURE
REPURPOSE
RECYCLE
RECOVER
extending existing use-cycle
extending to new use-cycle
effective application in end-of-life
products, parts & processes
materials

***Source**: Blomsma et al. (2019)*



Extend lifespan of product and its parts	**R3**	**Reuse**
	R4	**Repair**
	R5	**Refurbish**
	R6	**Remanufacture**
	R7	**Repurpose**
Useful application of materials	**R8**	**Recycle**
	R9	**Recovery**

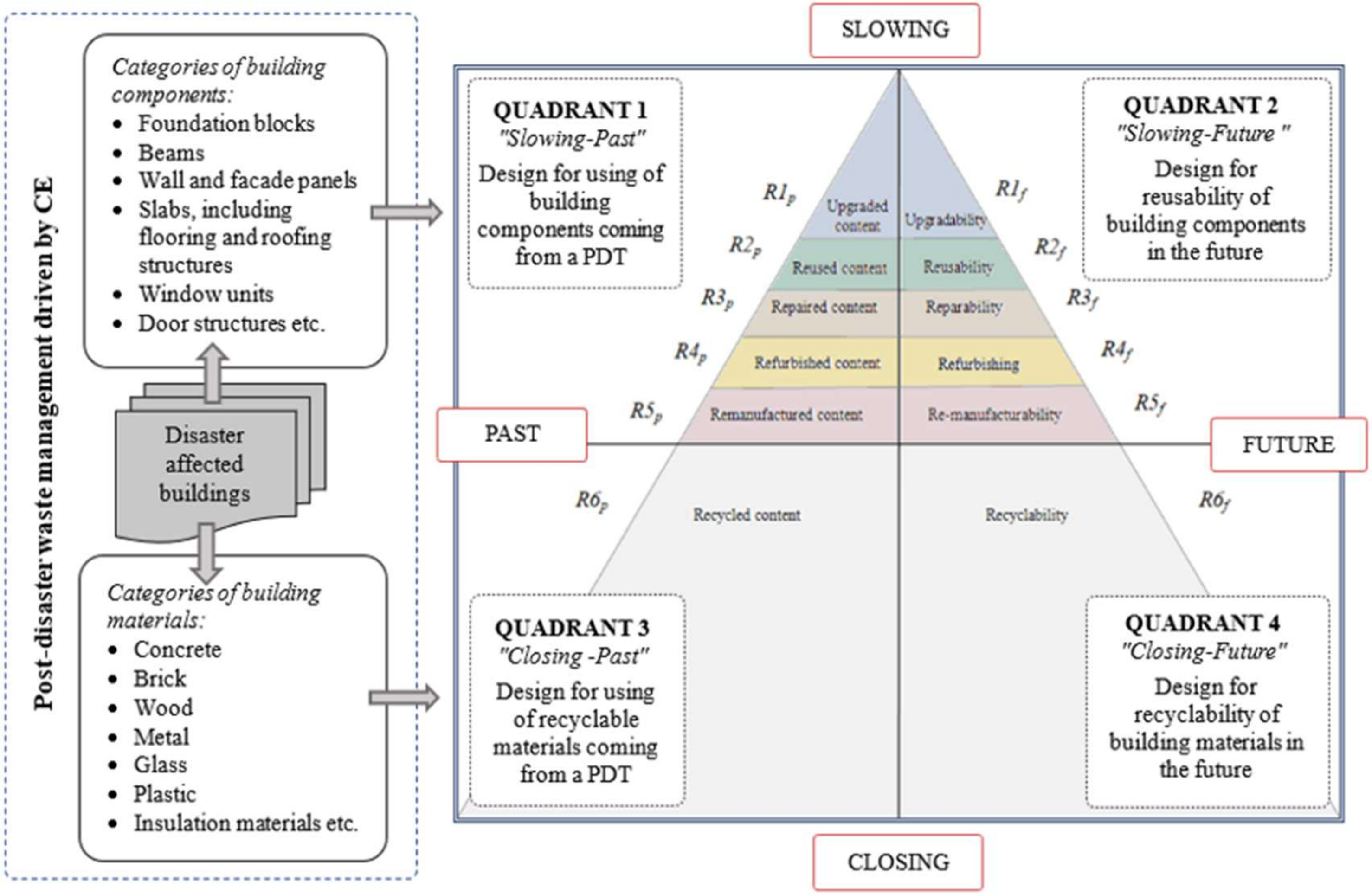
***Source**: Potting et al. (2017)*


Slowing the loop
Building components coming from a PDT
Building materials coming from a PDT
Future building components cycle extension
Future building materials cycle extension
$R1_p$
Upgraded content
$R2_p$
Reused content
$R3_p$
Repaired content
$R4_p$
Refurbished content
$R5_p$
Remanufactured content
$R6_p$
Recycled content
$R1_f$
Upgradability
$R2_f$
Reusability
$R3_f$
Reparability
$R4_f$
Refurbishing
$R5_f$
Re-manufacturability
$R6_f$
Recyclability
Past
Future
Closing the loop

***Source**: T. Shevchenko, B. Yannou, M. Saidani, Dallas, Texas, USA, 11-14 August 2025*

3. Framework of circular recovery

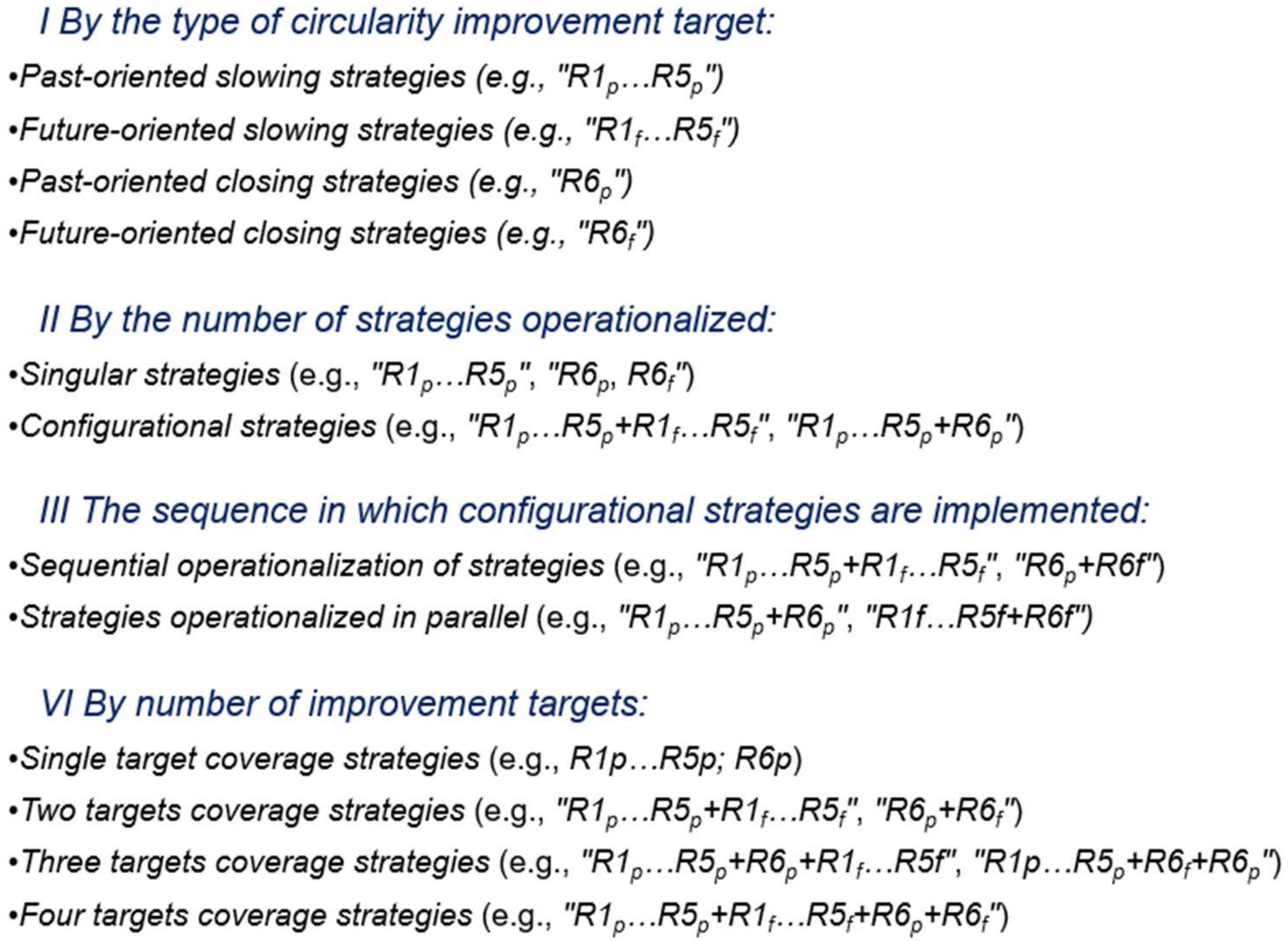
Post-disaster circular recovery targets


Post-disaster waste management driven by CE
Categories of building components:
- Foundation blocks
- Beams
- Wall and facade panels
- Slabs, including flooring and roofing structures
- Window units
- Door structures etc.
Disaster affected buildings
Categories of building materials:
- Concrete
- Brick
- Wood
- Metal
- Glass
- Plastic
- Insulation materials etc.
SLOWING
PAST
FUTURE
CLOSING
QUADRANT 1
"Slowing-Past"
Design for using of building components coming from a PDT
QUADRANT 2
"Slowing-Future"
Design for reusability of building components in the future
QUADRANT 3
"Closing -Past"
Design for using of recyclable materials coming from a PDT
QUADRANT 4
"Closing-Future"
Design for recyclability of building materials in the future
$R1_p$
$R2_p$
$R3_p$
$R4_p$
$R5_p$
$R6_p$
$R1_f$
$R2_f$
$R3_f$
$R4_f$
$R5_f$
$R6_f$
Upgraded content
Upgradability
Reused content
Reusability
Repaired content
Reparability
Refurbished content
Refurbishing
Remanufactured content
Re-manufacturability
Recycled content
Recyclability

Source: *T. Shevchenko, S. Çetin, B. Yannou, Y. Kirchherr et al. (2025), JCLEPRO-D-25-12225*

3. Framework of circular recovery

Typology of circular design strategies



I By the type of circularity improvement target:

- *Past-oriented slowing strategies (e.g., "$R1_p \ldots R5_p$")*
- *Future-oriented slowing strategies (e.g., "$R1_f \ldots R5_f$")*
- *Past-oriented closing strategies (e.g., "$R6_p$")*
- *Future-oriented closing strategies (e.g., "$R6_f$")*

II By the number of strategies operationalized:

- *Singular strategies* (e.g., "$R1_p \ldots R5_p$", "$R6_p$, $R6_f$")
- *Configurational strategies* (e.g., "$R1_p \ldots R5_p + R1_f \ldots R5_f$", "$R1_p \ldots R5_p + R6_p$")

III The sequence in which configurational strategies are implemented:

- *Sequential operationalization of strategies* (e.g., "$R1_p \ldots R5_p + R1_f \ldots R5_f$", "$R6_p$+R6f")
- *Strategies operationalized in parallel* (e.g., "$R1_p \ldots R5_p + R6_p$", "R1f…R5f+R6f")

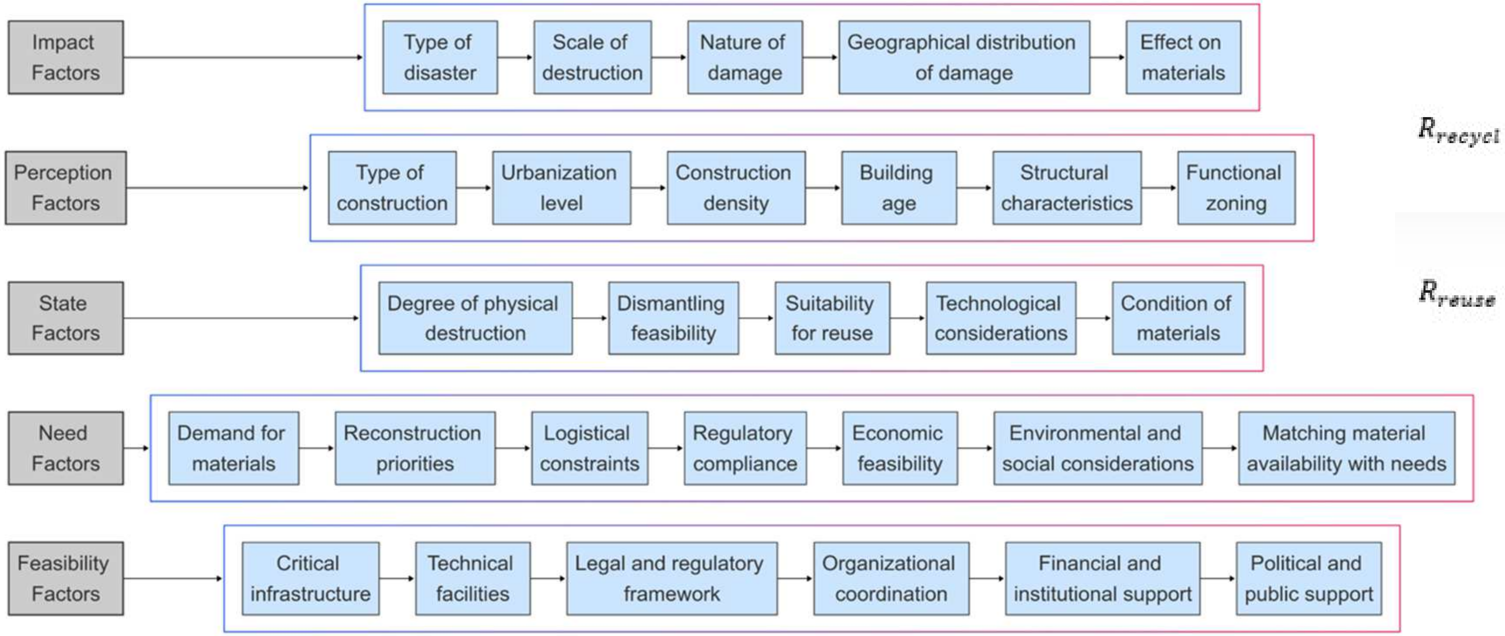
VI By number of improvement targets:

- *Single target coverage strategies* (e.g., *R1p…R5p; R6p*)
- *Two targets coverage strategies* (e.g., "$R1_p \ldots R5_p + R1_f \ldots R5_f$", "$R6_p + R6_f$")
- *Three targets coverage strategies* (e.g., "$R1_p \ldots R5_p + R6_p + R1_f \ldots$R5f", "R1p…$R5_p + R6_f + R6_p$")
- *Four targets coverage strategies* (e.g., "$R1_p \ldots R5_p + R1_f \ldots R5_f + R6_p + R6_f$")

Source: *T. Shevchenko, S. Çetin, B. Yannou, Y. Kirchherr et al. (2025), JCLEPRO-D-25-12225*

4. Circularity potential assessment

Methodology of post-disaster circularity assessment



Impact Factors → Type of disaster → Scale of destruction → Nature of damage → Geographical distribution of damage → Effect on materials

Perception Factors → Type of construction → Urbanization level → Construction density → Building age → Structural characteristics → Functional zoning

State Factors → Degree of physical destruction → Dismantling feasibility → Suitability for reuse → Technological considerations → Condition of materials

Need Factors → Demand for materials → Reconstruction priorities → Logistical constraints → Regulatory compliance → Economic feasibility → Environmental and social considerations → Matching material availability with needs

Feasibility Factors → Critical infrastructure → Technical facilities → Legal and regulatory framework → Organizational coordination → Financial and institutional support → Political and public support

$$R_{recycl} = \sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{v} P_{recycl\ jk} = \sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{v} y_{jk} \cdot \sigma_j$$

$$R_{reuse} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{v} P_{reuse\ ik} = \sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{v} x_{ik} \cdot \varphi_i$$

$$\varphi_\mathrm{i} = f(T_i, E_i) = f(T_{DL\ i}, T_{DI\ i}, T_{SI\ i}, T_{DE\ i}, T_{DS\ i}, E_{DC\ i}, E_{RC\ i}$$

$$\sigma_\mathrm{j} = f\left(T_j, E_j\right) = f(T_{MC\ j},\ T_{RI\ j},\ T_{SE\ j},\ T_{S\ j}, E_{PC\ j},\ E_{TC\ j})$$

$$X' = \begin{bmatrix} x'_{11} & x'_{12} & \cdots & x'_{1v} \\ x'_{21} & x'_{22} & \cdots & x'_{2v} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x'_{n1} & x'_{n2} & \cdots & x'_{nv} \end{bmatrix},\ Y' = \begin{bmatrix} y'_{11} & y'_{12} & \cdots & y'_{1v} \\ y'_{21} & y'_{22} & \cdots & y'_{2v} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y'_{n1} & y'_{n2} & \cdots & y'_{nv} \end{bmatrix}$$

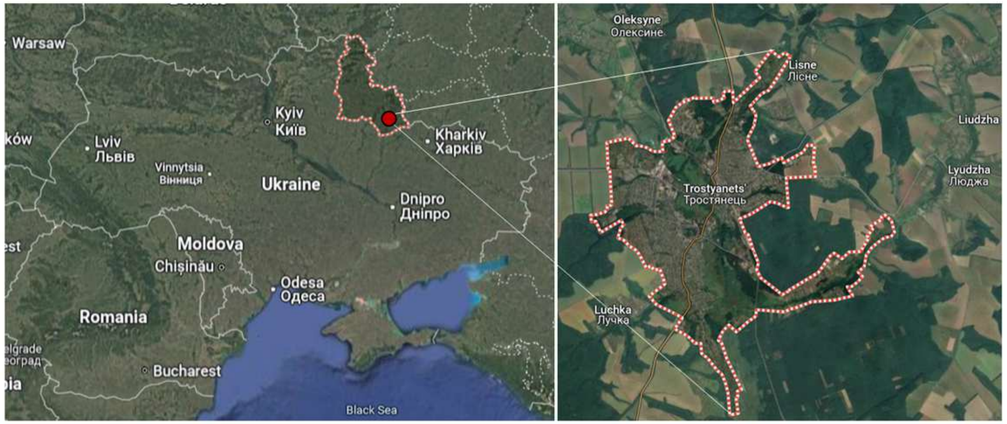
x'_{ik} – element of matrix X', representing the volume of reusable component i of sector k.

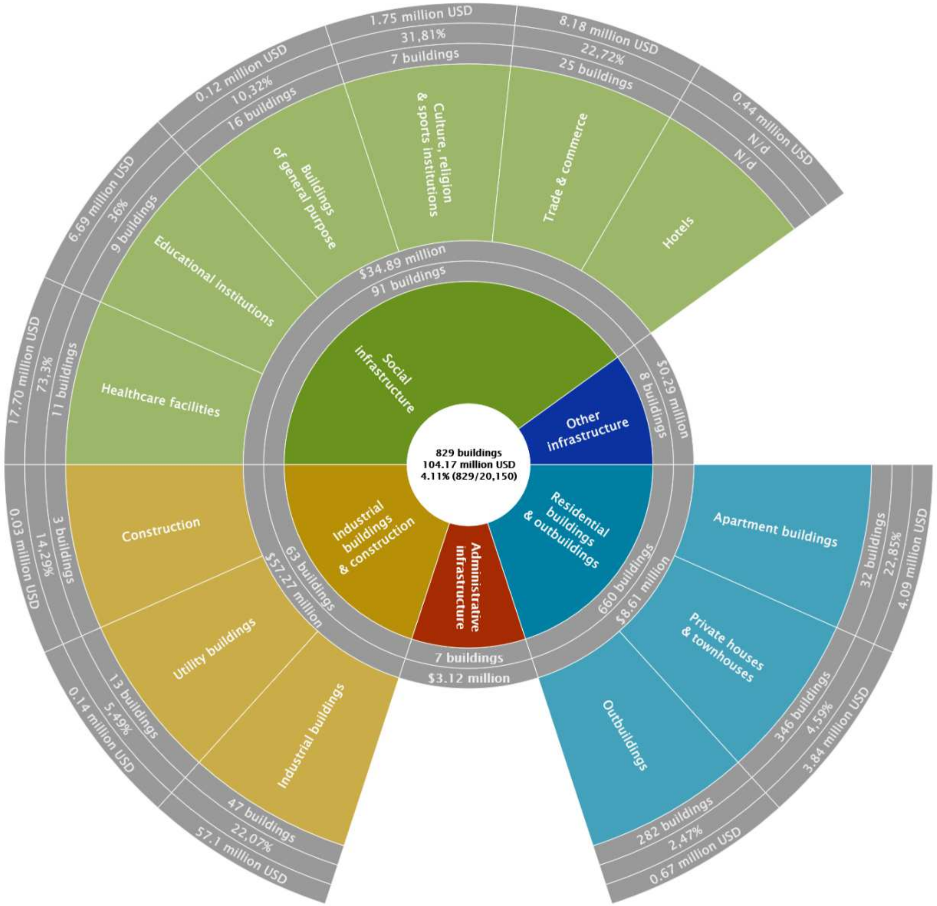
y'_{jk} – element of matrix Y', representing the volume of recyclable material j of sector k.

***Source**: T. Shevchenko et al. (2025) Draft manuscript*

4. Circularity potential assessment

Sunburst chart of consolidated damage by social-economic sectors in Trostianets (Sumy region)

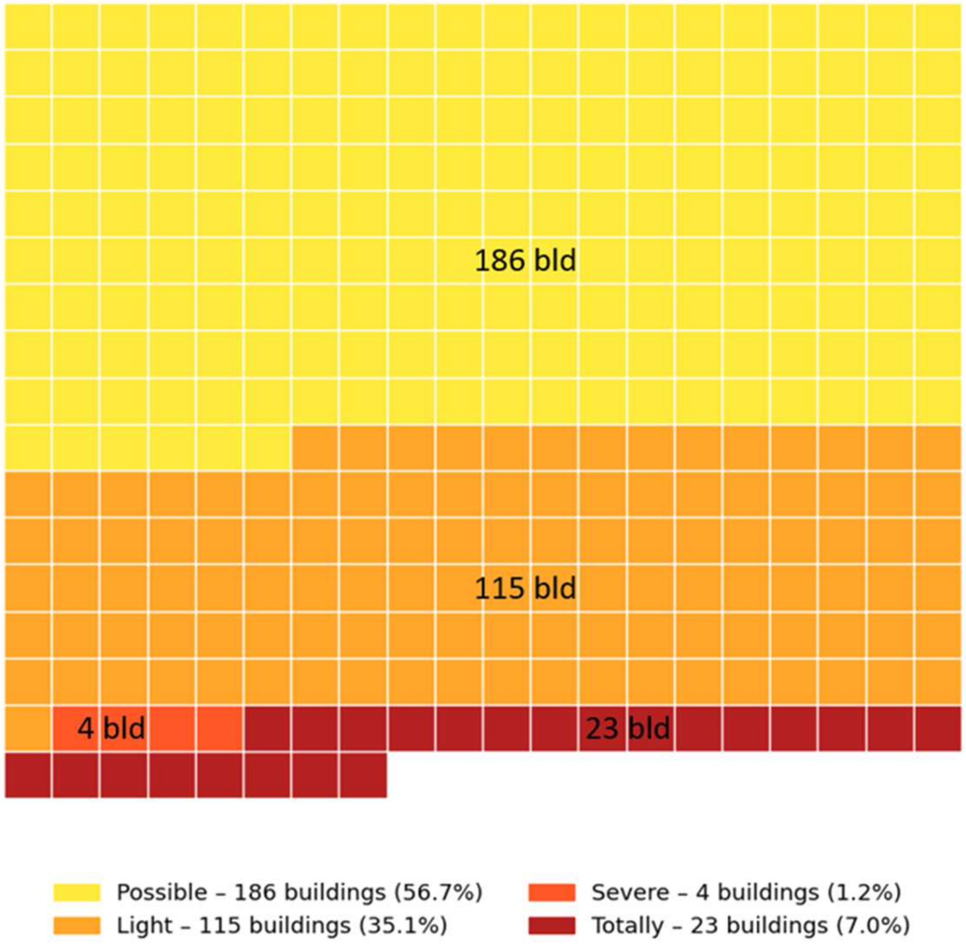

Warsaw
Kyiv
Київ
Lviv
Львів
Vinnytsia
Вінниця
Ukraine
Kharkiv
Харків
Dnipro
Дніпро
Moldova
Chișinău
Odesa
Одеса
Romania
Bucharest
Black Sea
Oleksyne
Олексине
Lisne
Лісне
Liudzha
Lyudzha
Люджа
Trostyanets'
Тростянець
Luchka
Лучка



***Source**: T. Shevchenko et al. (2025) Draft manuscript*

4. Circularity potential assessment

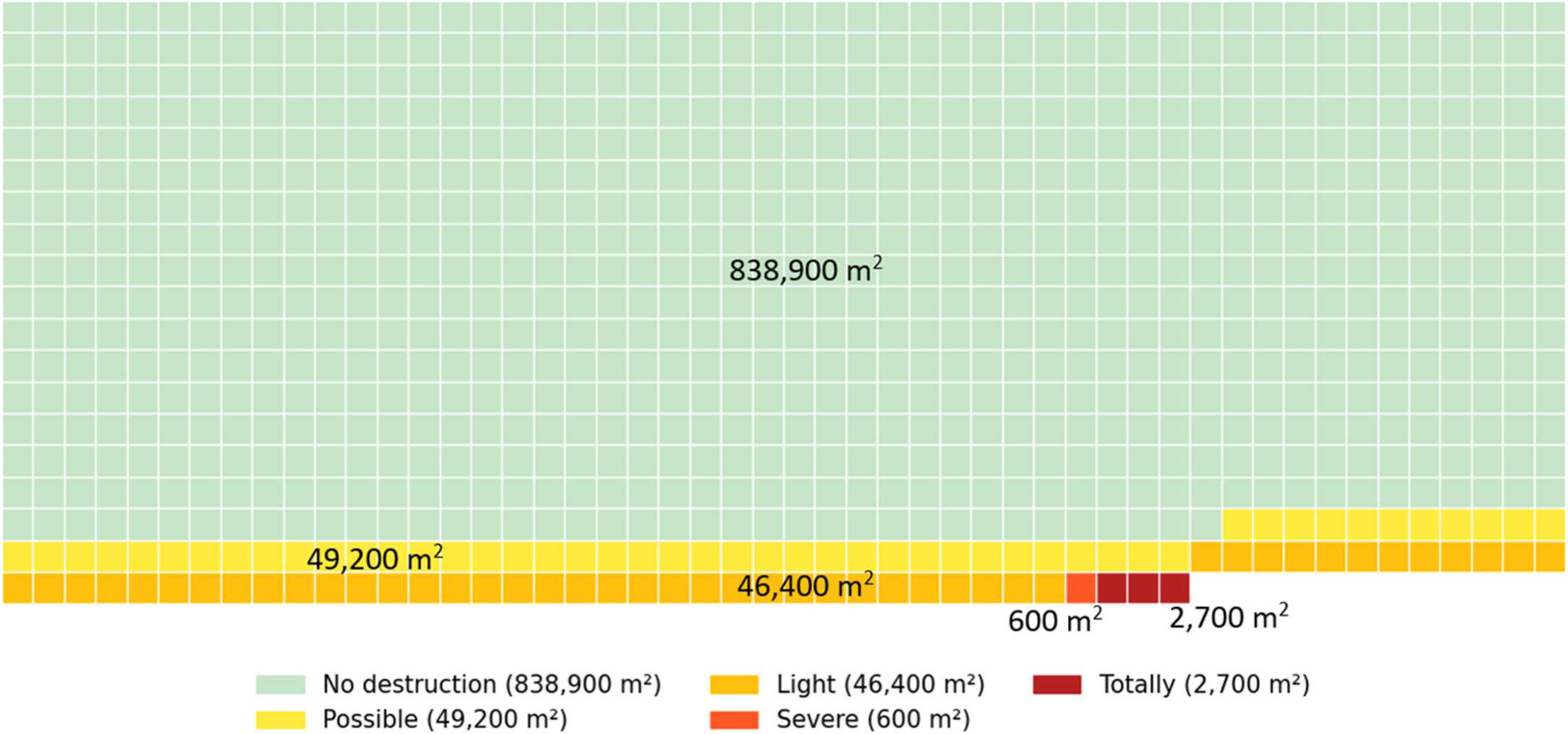
Pictogram of buildings by level of destruction of residential buildings in Trostianets, Sumy region, the end of 2022 (1 square = 1 building)



Source: *T. Shevchenko et al. (2025) Draft manuscript*

4. Circularity potential assessment

Pictogram of area by level of destruction of residential buildings in Trostianets, Sumy region, the end of 2022 (1 square = 1,000 m²)



***Source**: T. Shevchenko et al. (2025) Draft manuscript*

4. Circularity potential assessment

Recyclable potential

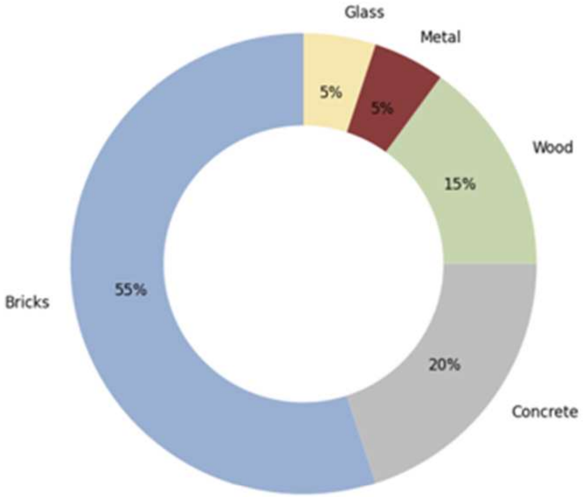


Fig. 8 Conditional share of materials of residential buildings (Building, 1992)

Note:

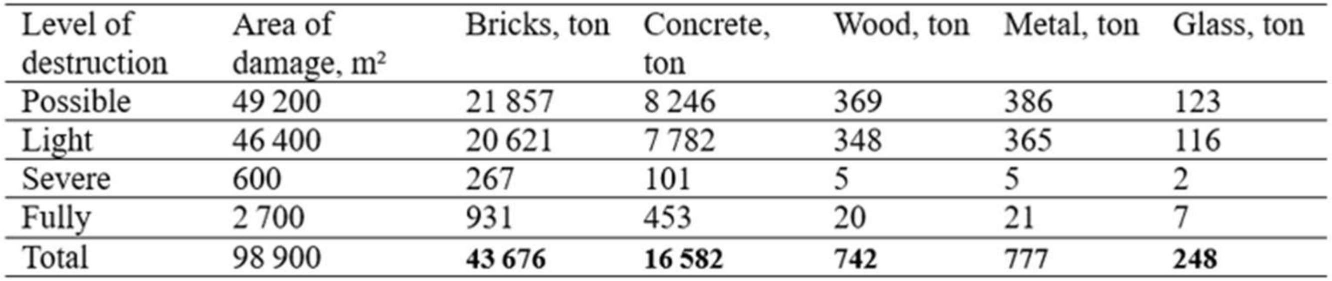
Conditional material volume, m^3 per 1 m^2:

bricks – 0.45, concrete – 0.35, wood – 0.10, metal – 0.02, glass – 0.01.

Density, kg per 1m^3:

bricks – 1800, concrete – 2400, wood – 500, metal – 7850, glass – 2500.

Table 3. Mass of materials of residential buildings sector in Trostuanets, Sumy region



Level of destruction	Area of damage, m^2	Bricks, ton	Concrete, ton	Wood, ton	Metal, ton	Glass, ton
Possible	49 200	21 857	8 246	369	386	123
Light	46 400	20 621	7 782	348	365	116
Severe	600	267	101	5	5	2
Fully	2 700	931	453	20	21	7
Total	98 900	**43 676**	**16 582**	**742**	777	**248**

***Source**: T. Shevchenko et al. (2025) Draft manuscript*

4. Circularity potential assessment

Volume of recyclable materials

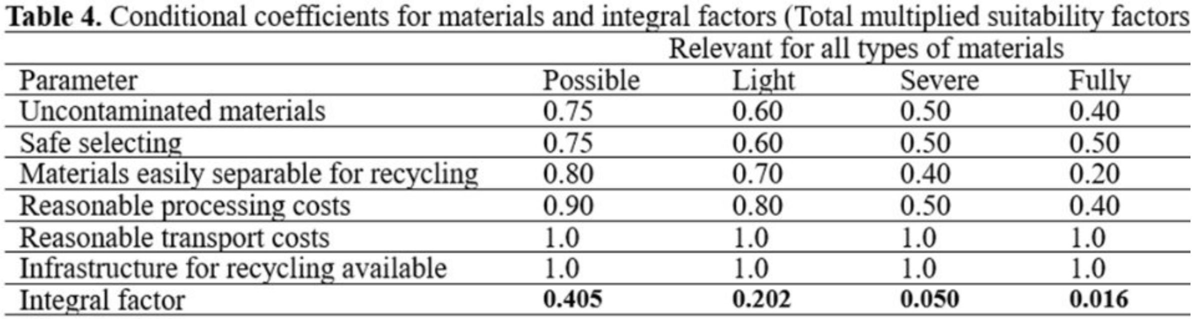


Table 4. Conditional coefficients for materials and integral factors (Total multiplied suitability factors

Parameter	Possible	Light	Severe	Fully
	Relevant for all types of materials			
Uncontaminated materials	0.75	0.60	0.50	0.40
Safe selecting	0.75	0.60	0.50	0.50
Materials easily separable for recycling	0.80	0.70	0.40	0.20
Reasonable processing costs	0.90	0.80	0.50	0.40
Reasonable transport costs	1.0	1.0	1.0	1.0
Infrastructure for recycling available	1.0	1.0	1.0	1.0
Integral factor	**0.405**	**0.202**	**0.050**	**0.016**

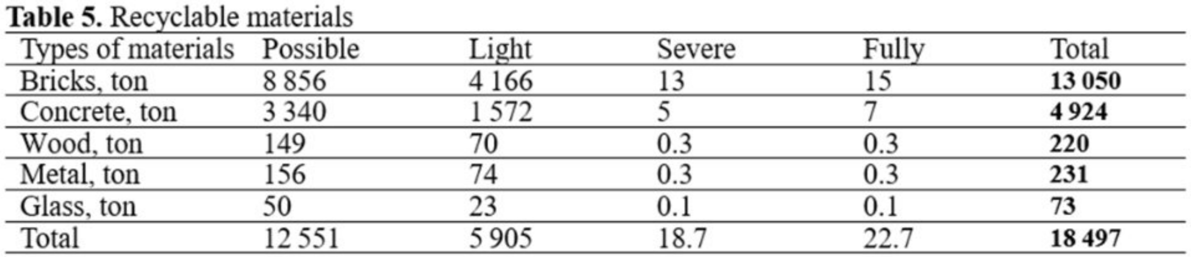


Table 5. Recyclable materials

Types of materials	Possible	Light	Severe	Fully	Total
Bricks, ton	8 856	4 166	13	15	**13 050**
Concrete, ton	3 340	1 572	5	7	**4 924**
Wood, ton	149	70	0.3	0.3	**220**
Metal, ton	156	74	0.3	0.3	**231**
Glass, ton	50	23	0.1	0.1	**73**
Total	12 551	5 905	18.7	22.7	**18 497**

$$X' = \begin{bmatrix} 13050 \\ 4924 \\ 220 \\ 231 \\ 73 \end{bmatrix}$$

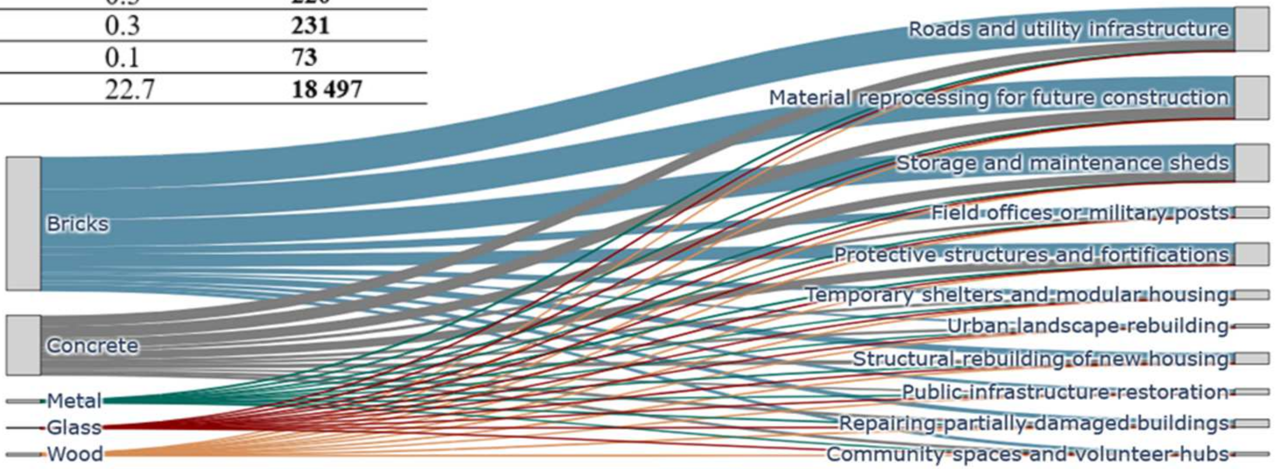

Bricks
Concrete
Metal
Glass
Wood
Roads and utility infrastructure
Material reprocessing for future construction
Storage and maintenance sheds
Field offices or military posts
Protective structures and fortifications
Temporary shelters and modular housing
Urban landscape rebuilding
Structural rebuilding of new housing
Public infrastructure restoration
Repairing partially damaged buildings
Community spaces and volunteer hubs

Figure. Reuse flows of materials with conditional distribution for post-war recovery and reconstruction needs

Source: *T. Shevchenko et al. (2025) Draft manuscript*

4. Circularity potential assessment

Volume of reusable components

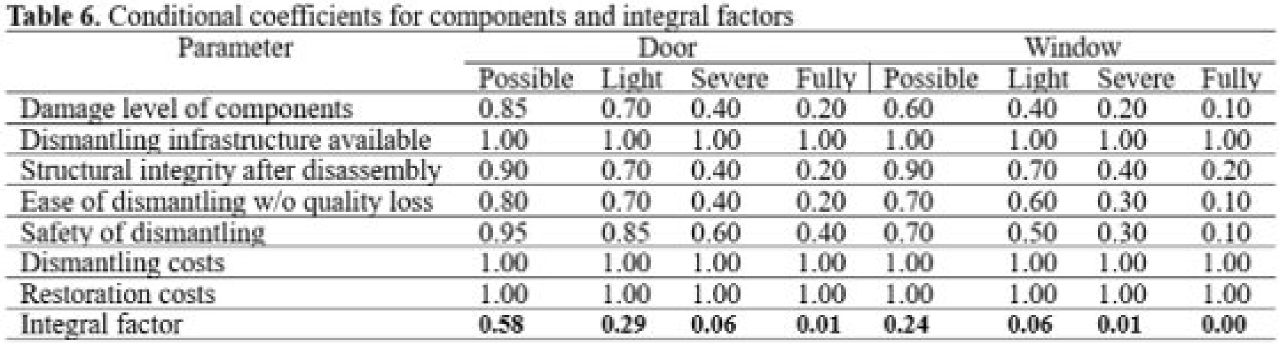


Table 6. Conditional coefficients for components and integral factors

Parameter	Door				Window			
	Possible	Light	Severe	Fully	Possible	Light	Severe	Fully
Damage level of components	0.85	0.70	0.40	0.20	0.60	0.40	0.20	0.10
Dismantling infrastructure available	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Structural integrity after disassembly	0.90	0.70	0.40	0.20	0.90	0.70	0.40	0.20
Ease of dismantling w/o quality loss	0.80	0.70	0.40	0.20	0.70	0.60	0.30	0.10
Safety of dismantling	0.95	0.85	0.60	0.40	0.70	0.50	0.30	0.10
Dismantling costs	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Restoration costs	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Integral factor	**0.58**	**0.29**	**0.06**	**0.01**	**0.24**	**0.06**	**0.01**	**0.00**

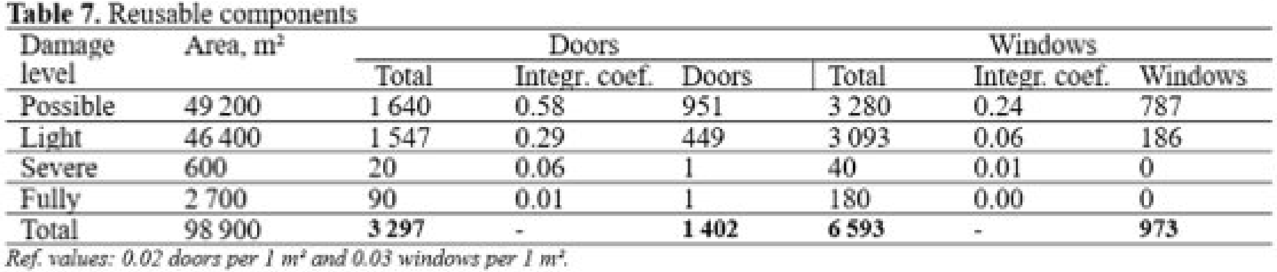


Table 7. Reusable components

Damage level	Area, m²	Doors			Windows		
		Total	Integr. coef.	Doors	Total	Integr. coef.	Windows
Possible	49 200	1 640	0.58	951	3 280	0.24	787
Light	46 400	1 547	0.29	449	3 093	0.06	186
Severe	600	20	0.06	1	40	0.01	0
Fully	2 700	90	0.01	1	180	0.00	0
Total	98 900	**3 297**	-	**1 402**	**6 593**	-	**973**

Ref. values: 0.02 doors per 1 m² and 0.03 windows per 1 m².

$$Y' = \begin{bmatrix} 1402 \\ 973 \end{bmatrix}$$

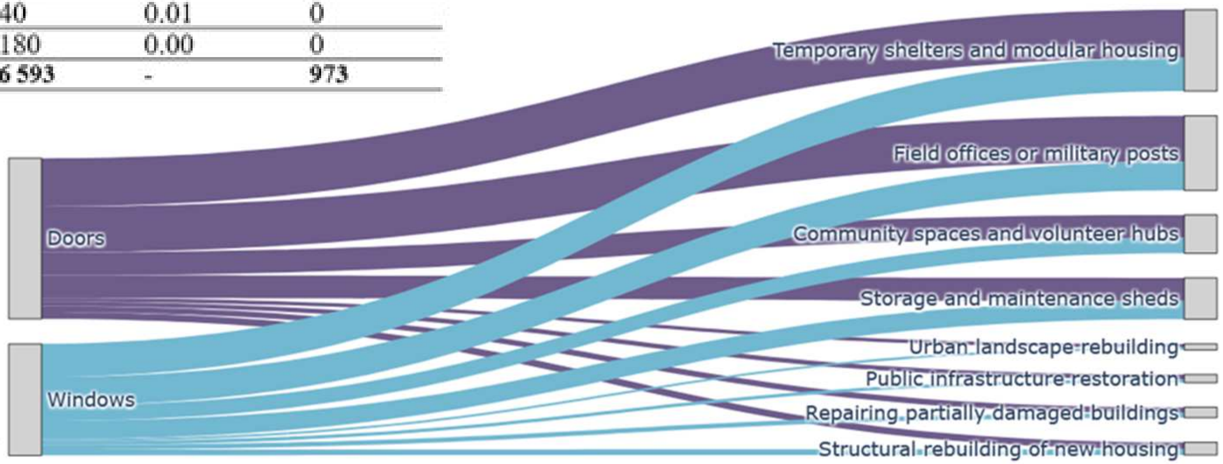


Figure. Reuse flows of doors and windows with conditional distribution for post-war recovery and reconstruction needs

***Source:** T. Shevchenko et al. (2025) Draft manuscript*

Developing the **circular economy** in the building sector means transforming the problem of **waste management** into an opportunity to ensure a more **sustainable supply** of resources with less impact on the environment

Développer **l'économie circulaire** dans le secteur du bâtiment, c'est transformer le problème de la **gestion des déchets** en une opportunité d'assurer un **approvisionnement plus durable** en ressources avec moins d'impact sur l'environnement

Merci de votre attention,
Des questions ?

CIRCULAR IT
LE NUMÉRIQUE AU SERVICE
DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE