

FutuREuse

La ville comme réserve de matériaux

Comprendre les études de gisement urbain



Bruxelles Environnement pour

Interreg 
North-West Europe

FCRBE
European Regional Development Fund

LE RÉEMPLOI DANS L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Le réemploi des matériaux de construction permet de réduire les impacts environnementaux du secteur de la construction, notamment en matière de changement climatique, de surconsommation des ressources et d'atteinte aux écosystèmes. Il s'agit également d'une stratégie efficace et pleine de bon sens pour prévenir la production de déchets.

Pourtant, malgré ses nombreux bénéfices, cette pratique est encore trop peu mise en oeuvre. La quantité de matériaux de construction récupérés pour un nouvel usage reste marginale par rapport aux flux totaux de matériaux et de déchets générés par l'industrie de la construction. Le réemploi des matériaux soulève encore de nombreuses questions, qui compliquent son adoption plus systématique dans les projets de construction.

LE PROJET FCRBE

FCRBE est l'acronyme de *Facilitating the Circulation of Reclaimed Building Elements*. Ce projet vise à augmenter de 50% le taux de matériaux de construction en circulation sur son territoire d'ici 2032. Sept partenaires sont impliqués : Rotor (Belgique) en tant que chef de file, Bellastock (France), Bruxelles Environnement (Belgique), l'Université de Brighton (Royaume-Uni), Salvo (Royaume-Uni), la Confédération de la Construction (Belgique), le Centre Scientifique et Technique de la Construction (Belgique) et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (France).

Pour plus d'informations sur le projet FCRBE : <http://www.nweurope.eu/fcrbe>

FUTUREUSE : 7 COURTES INTRODUCTIONS AU MONDE DU RÉEMPLOI

Le livret que vous avez en main fait partie d'une collection de courtes publications visant à répondre à des questions courantes sur le réemploi afin d'améliorer la compréhension de cette pratique et faire évoluer les comportements. Les sujets abordés par les sept livrets FutuREuse couvrent tout aussi bien les enjeux présents en amont, pendant et après une opération de réemploi et sont illustrés par de nombreux exemples inspirants. Cette collection s'attache aussi à mettre en évidence les bénéfices environnementaux de cette pratique, à clarifier les zones grises, à promouvoir des approches vertueuses ou encore à esquisser le portrait d'un futur où le réemploi serait devenu la norme.

DISCLAIMER

Ce document reflète uniquement le point de vue de ses auteurs ou autrices. Il ne représente ni ne se substitue à un conseil juridique ou technique personnalisé. Les auteurs ou autrices et les autorités de financement du projet FCRBE ne sont pas responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues dans ce document.

TABLE DES MATIÈRES

1. Le métabolisme urbain pour répondre aux défis actuels et futurs des villes	5
2. Etudier les gisements	8
Définition et caractéristiques	8
Comment aborder la nature dynamique des gisements de matériaux urbains	9
3. Travaux existants portant sur l'étude des gisements urbains	11
Bref état de l'art	11
Quelques exemples d'études sur les gisements urbains et leurs impact	12
Comparaison des différentes méthodes d'études du Métabolisme Urbain	20
4. Opportunités et limites	26
Un domaine de recherche émergent	26
Un domaine de recherche gourmand en données	26
La nécessité d'intégrer les acteurs	27
5. Le réemploi des gisements urbains ?	28
6. Bibliographie	30

Liste des figures

Figure 1. Le caractère linéaire du métabolisme urbain	6
Figure 2. <i>L'urban mining</i> selon une perspective circulaire	7
Figure 3. Les impacts environnementaux du métabolisme urbain	7
Figure 4. Approche rétrospective ou prospective des études du UM	9
Figure 5. Métabolisme urbain de Plaine Commune	12
Figure 6. Le métabolisme urbain à Bruxelles	14
Figure 7. Bilan matière comparant 3 stratégies de rénovation énergétique d'un bâtiment type	16
Figure 8. Gisements de matériaux et énergie intrinsèque de la ville de Melbourne	17
Figure 9. BTP FLUX : structure modèle	19
Figure 10. Différentes approches pour l'analyse des stock et des flux de matières : des combinaisons sont possibles	20
Figure 11. Échelles d'analyse	24

Liste des tableaux

Tableau 1. Outils utilisés dans les études sur le MU pour le traitement des données	22
Tableau 2. Stock de matières premières par mètre carré et par habitant : différences entre les échelles nationales et urbaines	23
Tableau 3. Différentes unités selon l'échelle de l'analyse	25

List des acronymes

BU	Approche ascendante de type Bottom-Up
SIG	Système d'information géographique
ACV	Analyse du cycle de vie
AFM	Analyse des flux de matières
ASM	Analyse des stocks de matières
EN	Éclairage nocturne
TD	Approche descendante de type Top-Down
MU	Métabolisme urbain

Ce livret vise à présenter en quoi consistent les études de flux et de stocks. Il explique comment celles-ci se sont développées et en quoi elles peuvent être utiles pour la mise en œuvre d'une économie plus circulaire, notamment par le développement des pratiques de réemploi des matériaux de construction. Ce livret s'adresse aux autorités publiques, aux décideurs, aux urbanistes et à toute personne qui souhaite en savoir plus sur ces questions.

1.

Le métabolisme urbain, une réponse aux défis actuels et futurs des villes¹

La population humaine augmente rapidement. Plus de la moitié d'entre elles vit dans des zones urbaines. Cette croissance est amenée à se poursuivre dans les années à venir : on estime que d'ici 2030 plus de 60 % de la population mondiale vivra en ville [1]. Ces villes ont toujours dépendu étroitement des campagnes environnantes pour assurer l'approvisionnement de toutes les ressources qui ne pouvaient pas être produites directement en zone urbaine (notamment l'énergie, la nourriture, l'eau, les matériaux, etc.). Ce sont aussi ces territoires connexes qui assurent une grande partie du traitement des déchets, des eaux usées et des pollutions diverses rejetés par les villes. La croissance démographique et la densification des zones urbaines ne font qu'intensifier les importations de biens et d'énergie et les exportations de déchets, augmentant ainsi la pression sur l'environnement (extraction de ressources naturelles, production de déchets) et les distances parcourues.

Ces constats et la prise de conscience des limites de notre planète ont conduit certains chercheurs à établir une comparaison entre les villes et le fonctionnement des organismes vivants. Bien que l'application du terme « métabolisme » des sociétés ait été formulé dans des ouvrages de sciences sociales dès le XIX^e siècle (par exemple chez Karl Marx), son application concrète à l'étude quantitative des relations entre les villes et leur environnement est plus récente. Le terme « métabolisme urbain » est apparu en 1965 dans les travaux de l'ingénieur américain Abel Wolman. En 1977, un botaniste belge, Paul Duvigneaud, a présenté l'une des premières études portant sur « l'écosystème urbain » de la ville de Bruxelles. Jusqu'alors, l'étude environnementale des milieux urbains était relativement cloisonnée et offrait peu de vue d'ensemble sur les pollutions et l'extraction de ressources associées aux villes.

En comparant une ville à un organisme vivant, les études sur le métabolisme urbain (MU) mettent l'accent sur la dépendance des villes aux ressources externes qu'elles

consomment, transforment, stockent et rejettent. Cependant, contrairement au processus métabolique des êtres vivants, qui pourrait être considéré comme « optimal » parce que relativement « cyclique » (les déchets des uns pouvant servir de ressource aux autres), les villes ne semblent pas aussi efficaces et durables. La nature des flux urbains est en effet complètement différente² : ils sont principalement de nature anthropique (carburant et électricité, eau, produits alimentaires, produits manufacturés, déchets et émissions polluantes, etc.) et suivent une trajectoire linéaire (faible circulation des flux par réemploi ou recyclage dans la ville ou via des synergies entre entreprises).

Les études sur le MU visent à comprendre ces flux et ces stocks et à évaluer les impacts occasionnés par ce système urbain. Elles peuvent s'inscrire dans le cadre de stratégies d'économie circulaire (EC) et de développement durable qui ont pour objectif de rendre les villes plus efficaces, résilientes et circulaires.

Ces études ont développé des méthodes de comptabilisation telles que l'analyse des flux de matières (AFM). Basée sur le principe de conservation de la masse, l'AFM propose de réaliser des bilans de masse (et d'énergie) dans un contexte donné (une ville, par exemple). D'après ce modèle, les entrées (càd les extractions et importations) qui sont consommées, transformées ou accumulées dans le système avant d'en ressortir (càd exportations et déchets). Ce type d'analyse nécessite un travail minutieux de collecte et d'harmonisation des données provenant de sources multiples et variées (base de données publique, industries, etc.). Mais au-delà de la simple comptabilité, les études sur le MU reposent sur une approche complexe qui rassemble de nombreuses méthodes à la croisée de diverses disciplines et domaines scientifiques³ : ingénierie, urbanisme, études environnementales mais aussi sciences sociales [2].

Les ressources importées dans la ville sont utilisées à des fins diverses et y sont « stockées » pour des durées variables avant de quitter la ville, généralement sous forme de déchets. À cet égard, le cas de l'environnement

1. L'expression métabolisme urbain sera abrégée par MU dans la suite du texte.

2. Plus d'informations ici : <https://environnement.brussels/l'environnement-etat-des-lieux/rapports-sur-letat-de-l'environnement/rapport-2011-2014/environnement-7>

3. Plus d'informations ici : <https://www.sciencepresse.qc.ca/blogue/liride/2019/05/30/metabolisme-urbain-transition-ecologique>

Consommation, traitement, stockage



Figure 1 : Le caractère linéaire du métabolisme urbain

bâti est très illustratif. Les matériaux et les éléments de construction sont transportés vers la ville où ils sont assemblés pour former des entités cohérentes telles que des bâtiments, des infrastructures, des espaces publics. En effet, les zones urbaines *présentent une forte intensité de matériaux contenus dans les bâtiments et les infrastructures* [3]. Une étude menée à Bruxelles montre que les bâtiments représentent 84 % de tous les matériaux présents dans la ville [4]. Néanmoins, malgré des durées de vie relativement longues et sous l'effet de divers facteurs techniques et socio-économiques, les matériaux qui composent ce stock d'environnement bâti finissent par être « libérés » un jour. Un nombre croissant « d'études de stock » ont analysé cette accumulation de matériaux dans l'environnement bâti urbain afin d'anticiper leur utilisation et leur valorisation ultérieure [5].

Les impératifs de rénovation énergétique du bâti existant [6] vont entraîner de nouveaux apports de matériaux et occasionner des travaux de démolition (totale ou partielle). Au cours de ceux-ci, les parties constitutives d'un bâtiment sont séparées et remises en circulation, généralement sous forme de déchets de construction et de démolition (C&D). Les possibilités de valorisation des flux libérés dépendent très largement de chaque contexte mais aussi de la composition initiale des bâtiments, c'est-à-dire des matériaux utilisés et de la manière dont ils sont assemblés.

C'est dans cette perspective que certaines organisations et certains chercheurs ont proposé l'expression « exploitation de la mine urbaine » (*urban mining*). Cette approche considère la ville comme un vaste gisement de ressources susceptibles d'être exploitées dans le futur (lorsqu'elles arrivent au bout d'un premier cycle de vie

utile). Plus précisément, cette approche poursuit plusieurs buts : éviter que des ressources potentielles ne soient éliminées sous forme de déchets, réduire la pression sur les ressources naturelles en prolongeant le cycle de vie des matériaux déjà extraits et stimuler le développement d'activités économiques locales liées à l'exploitation de la « mine urbaine ».

Dans la mesure où elles contribuent directement à ces objectifs, les logiques de réemploi figurent en bonne place dans les cadres réglementaires et stratégiques qui encadrent la transition des villes, des régions et des états vers les principes de circularité⁴. Cependant, les pratiques de réemploi restent assez marginales par rapport à la logique du recyclage (qui est souvent plutôt un sous-cycle). On estime aujourd'hui que moins de 1 % des matériaux de construction sont réemployés⁵. Dans ce contexte, l'étude de la composition de l'environnement bâti et de ses dynamiques de renouvellement peut jouer un rôle important pour consolider, stimuler et augmenter les pratiques de réemploi des matériaux de construction. Cependant, à ce jour, les études de MU qui se concentrent spécifiquement sur le réemploi restent rares.

4. Ce sujet est développé dans le livret *Construire une feuille de route : stratégie pour encourager le réemploi dans le secteur de la construction* de la collection futuREuse (par Emilie Gobbo pour Bruxelles Environnement, 2021), publiée dans le cadre du projet Interreg FCRBE.

5. Ce chiffre est une estimation développée dans le cadre du projet FCRBE et basée notamment sur les chiffres des dernières enquêtes BigRec menées par Salvo, et sur plusieurs variables telles que le nombre d'entreprises actives dans le réemploi des matériaux, la production de déchets de C&D et la population. Plusieurs évaluations de chantiers ont confirmé cette estimation. L'étude statistique également réalisée dans le cadre du projet FCRBE devrait consolider ce résultat (<https://www.nweurope.eu/projects/project-search/fcrbe-facilitating-the-circulation-of-reclaimed-building-elements-in-northwestern-europe/#tab-1>).

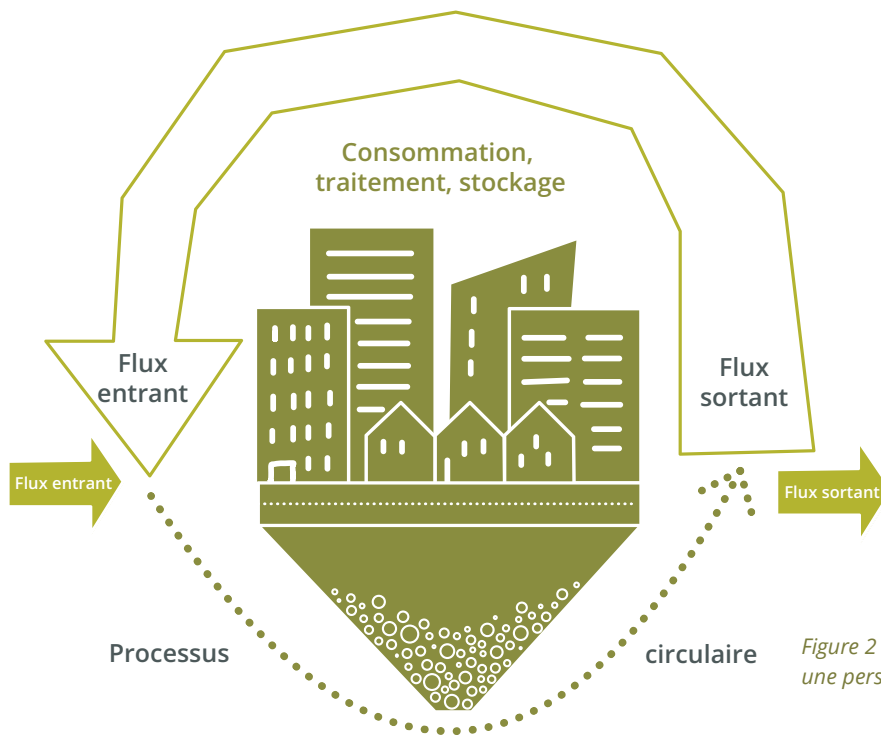


Figure 2 : L'urban mining selon une perspective circulaire

Plus largement, certaines études sur le MU visent également à évaluer les impacts environnementaux occasionnés par les villes, dans le but de réduire ceux-ci. Ces travaux associent l'AFM et l'analyse des stocks de matières premières (ASM) à des méthodes telles que

l'analyse du cycle de vie (ACV). Envisager le réemploi à l'aune de cette approche intégrée permet de mettre en évidence son intérêt en matière d'économie des ressources et de réduction des déchets⁶.

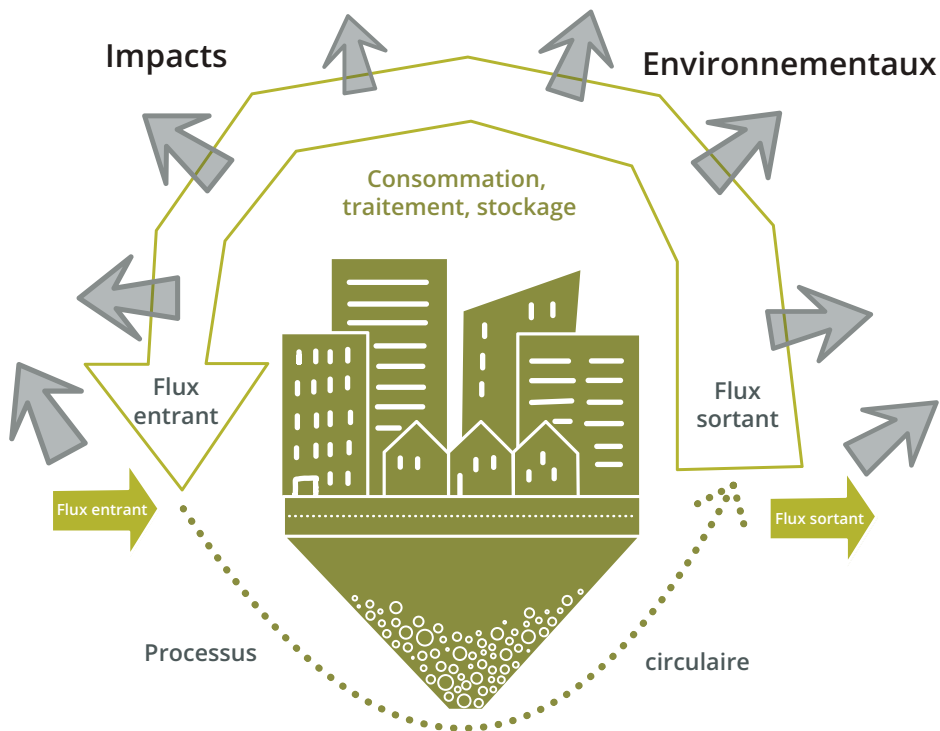


Figure 3 : Les impacts environnementaux du métabolisme urbain

6. Ce sujet est développé dans le livret *L'impact environnemental du réemploi dans le secteur de la construction* de la collection futuREuse (par Etienne Douguet, Florence Wagner and Mona Nasserredine pour le Centre Scientifique et Technique de la Construction (France) et le Belgian Building Research Institute (Belgique), 2021), publié dans le cadre du projet Interreg FCRBE.

2.

Étudier les gisements

Définition et caractéristiques⁷

Au niveau mondial, les gisements présents dans l'environnement bâti sont constitués de *matériaux et de produits qui restent dans l'anthroposphère*⁸ pendant une certaine période [7, p.5]. Toutefois, malgré l'analogie suggérée ci-dessus par l'expression urban mining, il existe des différences fondamentales entre la ville en tant que « gisement » de ressources potentielles et les gisements géologiques classiques que l'industrie minière a l'habitude d'exploiter. Les caractéristiques et les spécificités les plus importantes des gisements urbains sont :

- 1 Le **caractère hétérogène** de la ville, qui présente une grande diversité dans les types de matériaux accumulés.
- 2 Les difficultés d'**accès** au gisement liées à des aspects **fonciers et immobiliers** : les matériaux sont dispersés dans des bâtiments qui appartiennent à différents propriétaires. Il est donc difficile d'en assurer une gestion cohérente et unifiée (bien que des outils réglementaires puissent aider, par exemple en interdisant ou en limitant l'utilisation de certains matériaux ou en exigeant qu'ils soient gérés d'une manière spécifique) ;
- 3 Le **caractère densément bâti des villes** se prête mal à l'application de méthodes d'extraction industrielle largement mécanisées : la forte concentration de population oblige à minimiser les émissions (par exemple, la poussière et le bruit), les chargements de camions et autres nuisances.
- 4 Le **caractère dynamique** de la ville, dont le renouvellement se fait à des rythmes variables et imprévisibles. Dans la mesure où ces rythmes sont changeants et évoluent dans le temps, il est difficile d'estimer avec précision la nature et la quantité des gisements urbains de matériaux.
- 5 Il est complexe d'estimer quels matériaux seront **disponibles dans le futur** en raison de la relativement longue durée de vie des bâtiments et des infrastructures. Ce facteur induit un contexte

d'incertitude et d'imprévisibilité. *Même si l'âge moyen de démolition des bâtiments a diminué de plus de 200 ans à 70 ans (voire moins), il s'agit toujours d'une longue durée de vie* [3, p.3] au cours de laquelle plusieurs changements peuvent survenir : modification de l'usage et de l'affectation, rénovations lourdes et légères, démolitions, extensions, adaptations à de nouvelles exigences en matière de conformité technique et de performances ;

- 6 Les gisements urbains de matériaux peuvent avoir des statuts différents. Certains peuvent être considérés comme étant « consommés », c'est-à-dire qu'ils sont arrivés au bout de leur vie utile et ne sont plus récupérables. D'autres peuvent être considérés comme étant « en-cours », c'est-à-dire toujours en usage. On peut aussi évoquer les gisements « dormants » et « obsolètes ». Ceux-ci correspondent à des stocks qui ne sont plus en utilisation mais qui n'ont toutefois pas été éliminés. C'est par exemple le cas d'anciennes conduites souterraines inutilisées, des fondations de bâtiments démolis toujours présentes dans le sous-sol ou encore de bâtiments et d'installations inoccupés [8]. Ces gisements dormants peuvent être vus comme faisant partie du gisement consommé ou du gisements en-cours. Cela conforte le fait qu'il n'existe actuellement aucun véritable consensus sur la définition précise des gisements et de leur statut [7].

Enfin, on pourrait également faire valoir que la métaphore de la mine n'est peut-être pas la plus adéquate pour faire référence à des principes de gestion responsable des ressources et de limitations des impacts environnementaux, qui devraient être au cœur des approches circulaires. Dans ce cadre, toute activité contribuant à préserver la valeur d'usage des biens (comme la conservation, la réparation, le réemploi, la remise à neuf) doit être préférée aux stratégies de réduction des déchets.

7. Cette section s'appuie principalement sur deux publications récentes qui dressent un état de l'art des études de flux et de stocks urbains : [7] [3] dans la bibliographie.

8. L'anthroposphère est un terme utilisé pour désigner la masse totale des productions d'origine humaine, en ce y compris la population humaine en tant que telle et son interaction avec les systèmes terrestres.

Comment aborder la nature dynamique des gisements de matériaux urbains

Comme indiqué dans les sections précédentes, l'une des spécificités des gisements urbains de matériaux est leur caractère évolutif. Il existe deux façons d'étudier et de comprendre ce caractère dynamique : l'une est rétrospective, elle s'intéresse aux changements survenus dans le passé ; l'autre est prospective, elle s'intéresse aux changements futurs. Ces deux approches peuvent être considérées comme complémentaires dans la mesure où les études rétrospectives fournissent une base analytique qui peut servir à élaborer des scénarios dans une approche prospective. Ces études commencent souvent par produire un « instantané » du bâti existant à un instant « t » (déterminé, par exemple, sur la base des informations disponibles pour une année de référence). Même si la vitesse à laquelle ce stock évolue rend pratiquement impossibles d'obtenir des données totalement précises et actualisées, ces approches restent intéressantes pour comprendre l'évolution des gisements urbains dans le temps, en particulier pour des entités à longue durée de vie comme les bâtiments⁹.

Cette double approche temporelle fait également écho aux pratiques de réemploi. Collecter des données, des informations et des connaissances sur l'évolution des

techniques de construction et des matériaux au fil du temps (ce qui exige une approche rétrospective) peut aider à caractériser et à évaluer l'aptitude au réemploi de certains éléments de construction. Cette démarche gagne toutefois à être complétée par une évaluation sur place afin de s'assurer du potentiel de réemploi des composants⁹.

Le réemploi peut aussi s'envisager dans une vision prospective, ce qui introduit une dimension supplémentaire relative à la connaissance des gisements existants et de leur évolution. Il s'agit en effet de prévoir le réemploi futur dès le stade de la conception, et ce à toutes les échelles de l'environnement bâti :

- conception de produits/éléments et de systèmes d'assemblage durables, compatibles et facilement démontables,
- conception de bâtiments assurant la flexibilité, l'adaptabilité, la polyvalence et le remplacement en fonction de la durée de vie des différentes couches constitutives¹⁰.

9. Se référer au *Guide pour l'identification du potentiel réemploi des matériaux de construction*, produit par Interreg FCRBE (2021).

10. Ces considérations sont par ailleurs développées dans certains autres projets européens tels que le projet H2020 BAMB (<https://www.bamb2020.eu/>) et le projet FEDER-BBSM (<https://www.bbsm.brussels/en/productions-en/>).

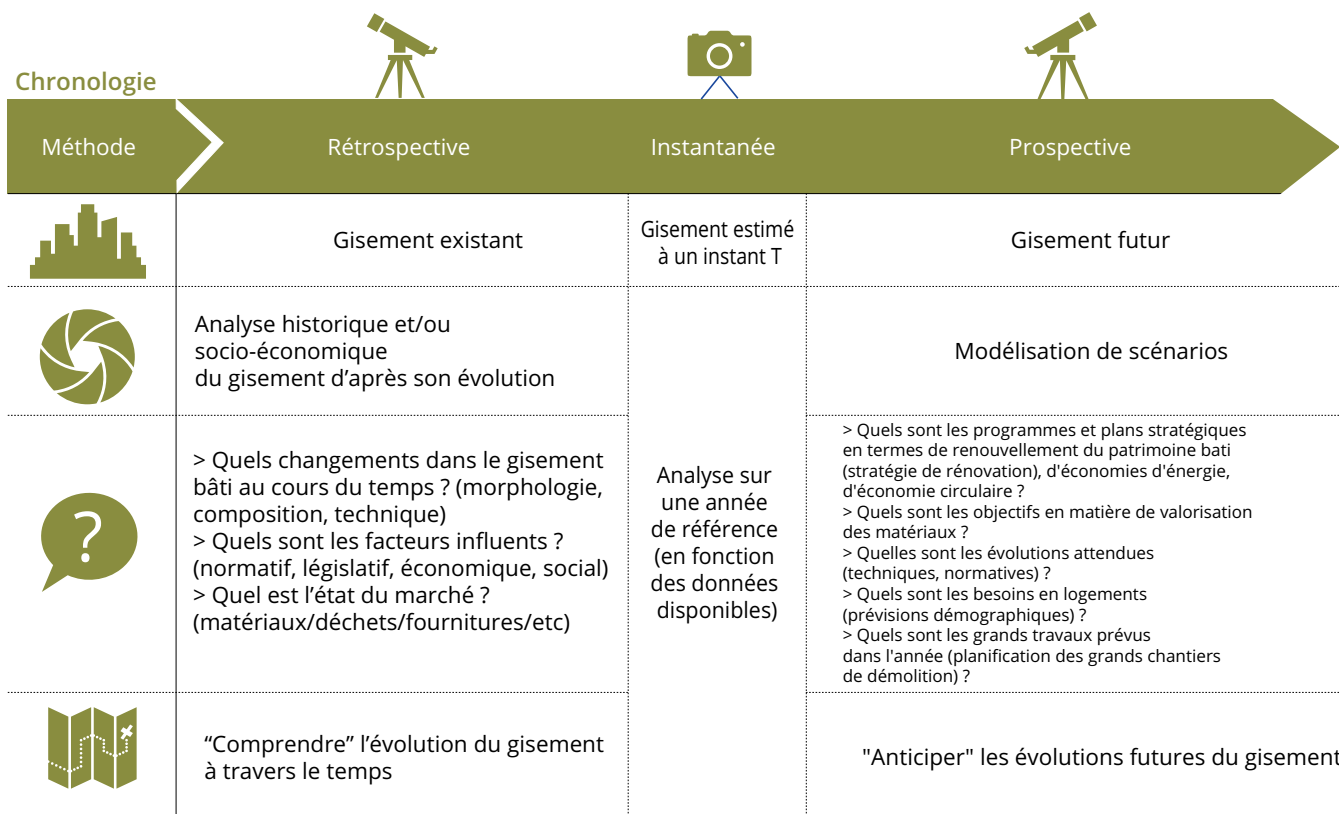


Figure 4 : Approches rétrospectives et prospectives des études du MU (source : E. Gobbo, 2021)

Appliquer une approche prospective à l'étude des pratiques de réemploi pourrait en outre permettre :

- d'anticiper les flux occasionnés par le remplacement fréquent de certains éléments présentant un potentiel de réemploi (par exemple, des éléments d'aménagement de bureaux tels que des cloisons, des portes intérieures, des plafonds suspendus et des planchers surélevés).
- d'évaluer l'impact de certaines stratégies d'intervention et, plus largement, d'estimer les bénéfices liés au réemploi des éléments (conservation d'éléments réutilisables, valeur économique, bénéfices environnementaux, impact sur la création d'emplois).

3.

Travaux existants portant sur l'étude des gisements urbains

Bref état de l'art

Connaître l'origine des matériaux présents dans les bâtiments existants est un enjeu crucial pour développer l'économie circulaire et envisager ainsi de réduire notre consommation de matières premières et notre production de déchets. S'il existe de nombreux travaux qui s'attachent à modéliser la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre correspondantes dans le bâtiment, les modélisations des dynamiques de stock et de flux sont plus rares. Néanmoins, l'évolution récente des études sur ce sujet montre qu'il existe un intérêt croissant pour la compréhension des gisements présents dans l'environnement bâti.

Des articles scientifiques récents font le point sur les publications actuelles consacrées à l'analyse des gisements présents dans l'environnement bâti et passent en revue près de 250 publications sur le sujet¹¹. L'une de ces analyses montre que de nombreuses études existantes portent sur des gisements de matières spécifiques, principalement les métaux [7]. Ce constat peut s'expliquer par la perspective d'une probable pénurie de ces ressources mais aussi par leur valeur économique. En ce qui concerne les matières secondaires minérales non métalliques, des études montrent que celles-ci seraient insuffisantes pour répondre pleinement à la demande future [9]. Environ un quart des études existantes portent sur les bâtiments [7]. Celles qui abordent les infrastructures sont moins nombreuses, bien que celles-ci constituent la majeure partie du gisement à l'échelle de l'Union européenne¹².

Une grande partie des infrastructures étant souterraine, il est difficile de collecter des données à leur propos et des méthodes telles que la télédétection ne sont pas possibles. En général, on observe un phénomène d'accumulation des gisements, mais jusqu'à quand ? Certaines études permettent de mieux comprendre les

facteurs qui peuvent influencer cette accumulation : population, vie dans les bâtiments, trafic, technologie [9] [10]. Si une grande partie des études existantes se concentrent sur la quantification des gisements, leurs impacts, leurs facteurs socio-économiques et les opportunités qu'ils peuvent représenter dans le développement de politiques pertinentes en matière de ressources et d'environnement restent largement inexplorés [9] [7]. En outre, il est important de souligner que stabiliser les gisements existants en prolongeant la durée de vie des infrastructures et des bâtiments existants permettrait de réduire plus facilement la consommation des matériaux [12].

Malheureusement, très peu d'études intègrent des considérations sur le réemploi qui, par ailleurs, est souvent confondu avec le recyclage. Cette situation est d'autant plus interpellante que le réemploi figure pourtant en bonne place dans les stratégies de transition vers une économie circulaire¹³. Cette absence relative s'explique en partie par plusieurs facteurs : le caractère difficile et fastidieux de la collecte de données (encore plus pour le réemploi ?) [3], l'échelle étudiée par ces travaux (l'échelle urbaine est-elle trop grande pour faire un focus sur le réemploi ?), ou encore le choix des unités de mesure et de quantification (pas complètement adaptées au réemploi ?). En outre, pour mettre en œuvre des stratégies d'économie circulaire, la connaissance fine de la nature et des quantités de matériaux en jeu est essentielle pour attribuer une valeur à ces ressources.

Dans la section sur les différentes méthodes utilisées pour étudier le MU, nous passerons en revue les différentes méthodes et proposerons une manière de les utiliser pour étudier, sous l'angle du réemploi, les gisements présents dans le bâti urbain. La section suivante présente différentes ASM en mettant en évidence leurs objectifs et leurs méthodes respectives mais aussi la façon dont elles peuvent être utilisées pour mettre en œuvre une économie plus circulaire, notamment via le réemploi.

13. Ce sujet est développé dans le livret *Construire une feuille de route : stratégie pour encourager le réemploi dans le secteur de la construction* de la collection *futuREuse* (par Emilie Gobbo pour Bruxelles Environnement, 2021), publié dans le cadre du projet Interreg FCRBE.

11. [7] [3] [9]

12. [9] [7] [10] [11]

LE MÉTABOLISME URBAIN DE PLAINE COMMUNE, PARIS, FRANCE (2021)

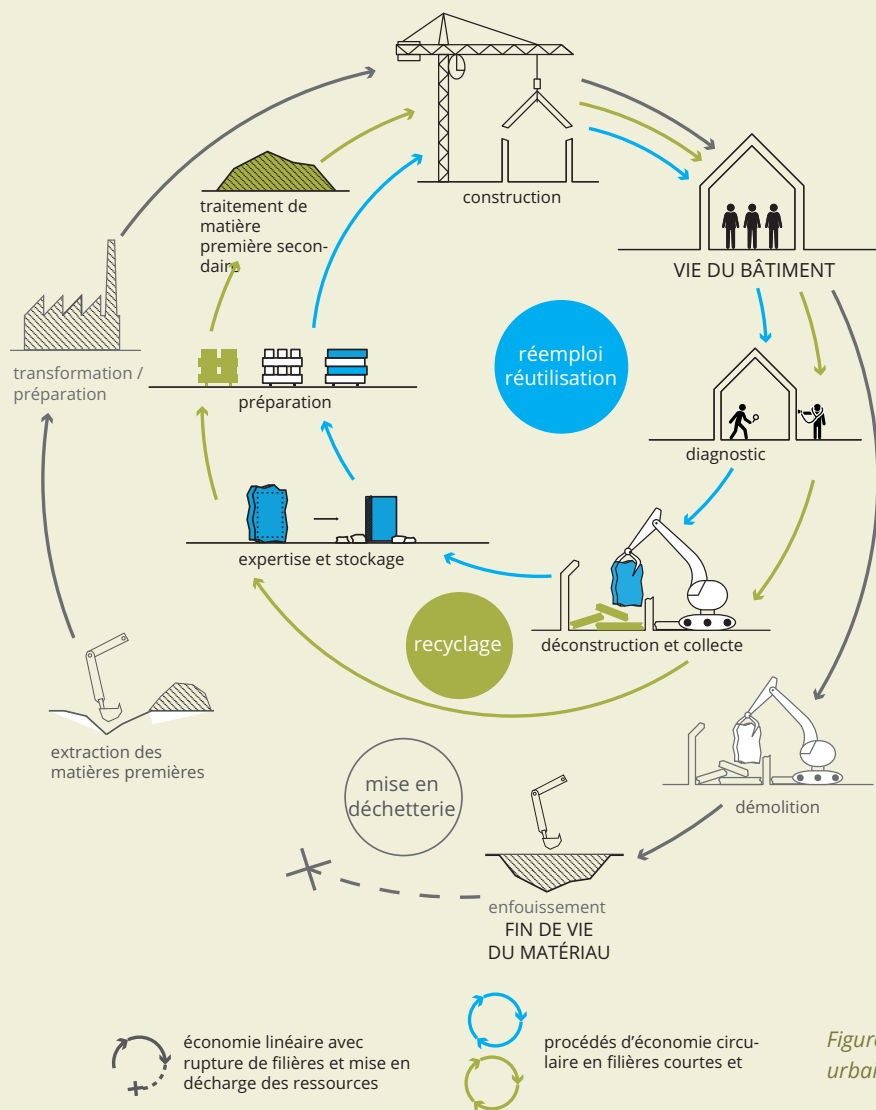


Figure 5 : Métabolisme urbain de Plaine Commune

(Source: Bellastock, 2017)

CONTEXTE

Le projet « Métabolisme urbain », mené par Plaine Commune, est une approche d'économie circulaire appliquée au secteur du bâtiment et des travaux publics. Cette approche expérimentale cherche à planifier et à optimiser la gestion des ressources en développant 5 axes de travail¹⁴ :

- Expérimenter des logiques de réemploi des matériaux de construction en synergie entre 30 sites pilotes
- Mettre en place des plateformes de tri, de stockage et de recyclage des ressources sur site
- Soutenir le déploiement de filières locales pour le réemploi et le recyclage des matériaux de construction
- Développer un outil numérique permettant de rendre visibles les gisements de matériaux et de prendre en compte les externalités induites par les approches circulaires qui sont mises en œuvre
- Soutenir le développement des compétences des acteurs locaux, depuis les chefs de projets jusqu'aux entreprises, par des formations, des conférences, des visites et le déploiement d'une culture du réemploi auprès de différents acteurs et usagers du territoire.

14. Plus d'informations ici : <https://www.bellastock.com/projets/metabolisme-urbain-de-plaine-commune/>.

À QUOI A ABOUTI CETTE ÉTUDE ?

Ce projet est toujours en cours en 2021. Il comporte la réalisation d'études mais aussi une approche expérimentale sur le terrain. C'est sans aucun doute sa force et ce qui permet d'identifier ses bénéfices concrets. Ceux-ci incluent :

- la caractérisation de la mine urbaine et l'identification des matériaux aptes au réemploi ou au recyclage présent dans cette région grâce à la réalisation de diagnostics ressources dans les 30 chantiers pilotes (qui constituent un échantillon représentatif de la région) ;
- la mise en œuvre opérationnelle de stratégies de réemploi, notamment par des outils de planification tels que l'introduction de clauses « Métabolisme urbain » dans les documents-cadres et les schémas d'aménagement du territoire mais aussi par l'appui aux maîtres d'ouvrage pour créer des opportunités de synergie.
- la rédaction de documents et de méthodes génériques permettant à différents acteurs de mettre en place des démarches circulaires à la fin de ce projet de 3 ans.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTUDE : Approche ascendante, Flux (et stocks dans une moindre mesure), Instantané. L'étude aborde directement l'enjeu du réemploi, qui est opérationnalisé et mis en œuvre par différents acteurs dans des projets concrets.

LE MÉTABOLISME URBAIN DE LA RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE, BELGIQUE (2015)

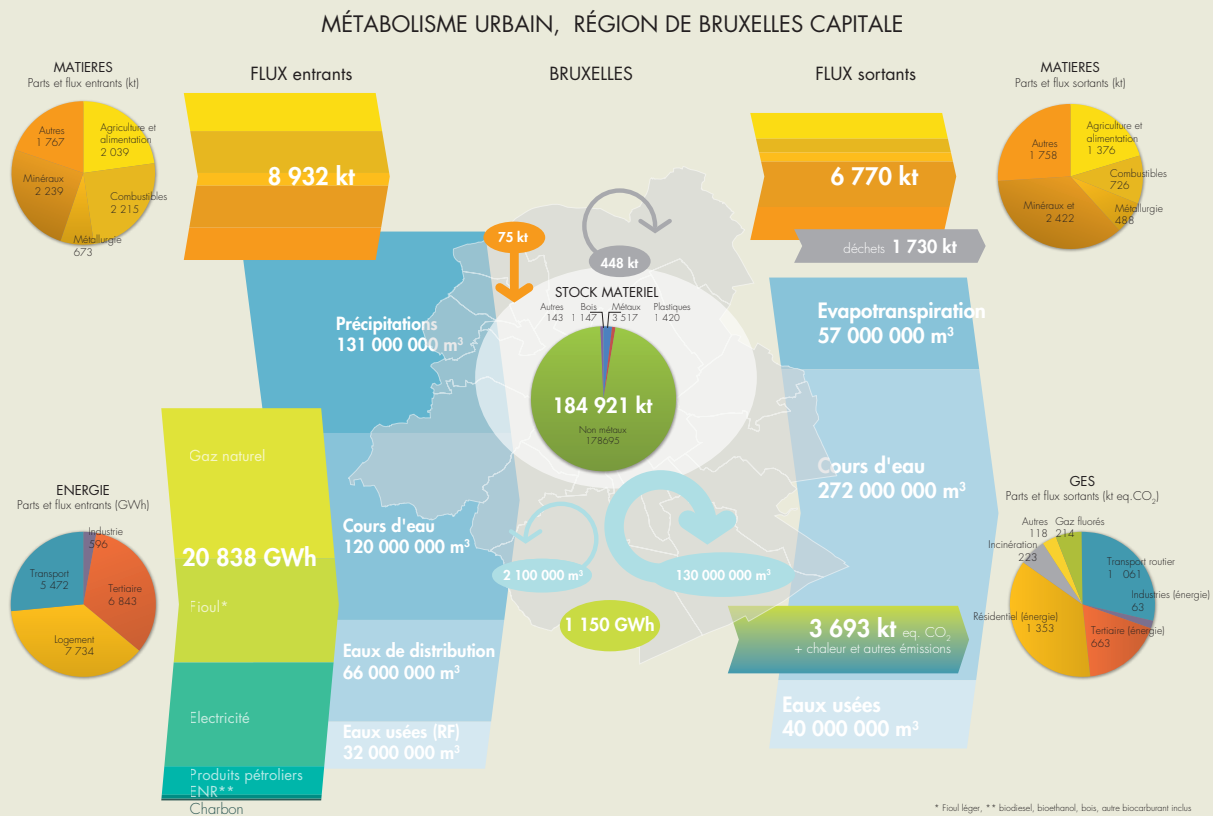


Figure 6 : Le métabolisme urbain à Bruxelles (Source: ICEDD – ECORES – BATir, 2014)

CONTEXTE

Une étude du métabolisme urbain de la Région de Bruxelles-Capitale a été entreprise en 2015¹⁵ conduite par Ecores Basée sur des données statistiques et quelques hypothèses, cette étude a mis en évidence l'impact considérable de l'industrie de la construction :

- La majorité des flux d'énergie (75 %) et d'eau (98 %), ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (GES) (65 %) proviennent de l'utilisation des bâtiments, tandis que la phase de construction consomme très peu d'énergie et d'eau.
- Le secteur de la construction est responsable de plus d'un tiers des déchets sortants et d'un tiers des matériaux entrants.
- Le gisement urbain était estimé à environ 185 000 kt, dont 84 % constitué par les bâtiments et 15 % par les infrastructures.

Une étude complémentaire a ensuite été menée spécifiquement sur le secteur de la construction. Celle-ci a identifié certains flux clés pour le développement potentiel de filières circulaires (cloisons modulaires, dalles de moquette, dalles de sols techniques et plafonds suspendus). Ces éléments représentent un potentiel de 8 500 tonnes/an provenant du gisement bruxellois. Si un quart de ces éléments était revendu à un quart de leur prix initial, plus de 8 000 000 € et une cinquantaine d'ETP non délocalisables pourraient ainsi être générés. Le potentiel économique du réemploi des équipements techniques dans les bâtiments tertiaires est estimé à environ 12 millions d'euros par an, ce qui pourrait créer 70 ETP locaux.

15. Plus d'informations ici : http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/RAP_20150715_Metabolisme_RBC_rapport_compile.pdf.

À QUOI A ABOUTI CETTE ÉTUDE ?

L'étude du métabolisme urbain a servi de base au développement de la vision de l'économie circulaire dans le secteur de la construction à Bruxelles¹⁶ et à l'élaboration du programme régional d'économie circulaire¹⁷, qui comprend une feuille de route pour les acteurs du secteur de la construction¹⁸. Toutefois, certaines limites persistent. Les données précises concernant les activités du secteur de la construction et le gisement existant sont souvent incomplètes, difficiles à obtenir voire même inexistantes. La quantification des flux de matières est donc basée sur de nombreuses hypothèses et estimations. Par extension, ce manque de données précises complique l'évaluation du potentiel de valorisation de ces flux au sein de la Région de Bruxelles-Capitale.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTUDE : Approche descendante, Flux (et stocks dans une moindre mesure), Instantané. Le réemploi n'est pas directement abordé bien que certains flux-clés soient cités dans l'étude complémentaire sur le développement potentiel de nouvelles filières circulaires dans la construction.

16. Plus d'informations ici : https://www.circulareconomy.brussels/wp-content/uploads/2017/10/RAP_2017_Economie-Circulaire-Construction.pdf.

17. Plus d'informations ici : http://document.environnement.brussels/opac_css/elecfile/PROG_160308_PREC_DEF_FR.

18. Plus d'informations ici : https://www.circulareconomy.brussels/wp-content/uploads/2019/06/BE_beCircular_feuille-de-route-CD_def_FR1.pdf.

UNE ÉTUDE SUR L'EXPLOITATION DU GISEMENT URBAIN PAR LE SECTEUR DE LA CONSTRUCTION EN RÉGION DE BRUXELLES-CAPITALE, BELGIQUE (2021)

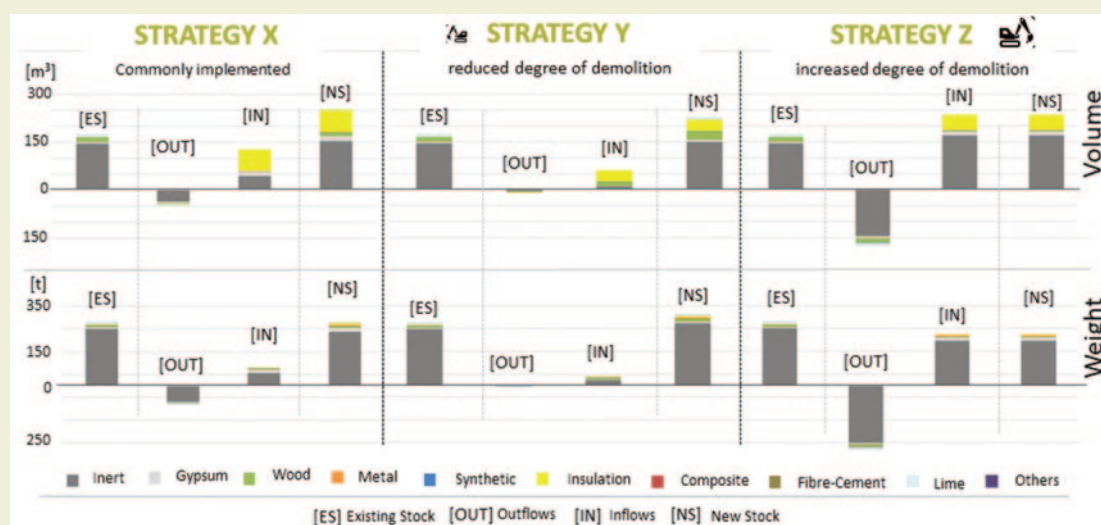


Figure 7 : Bilan matière comparant 3 stratégies de rénovation énergétique d'un bâtiment type

CONTEXTE

Le projet BBSM (*le Bâti Bruxellois, Source de nouveaux Matériaux*)¹⁹, financé par le FEDER, vise à évaluer la valeur potentielle des matériaux présents dans les bâtiments dans une perspective circulaire. La recherche examine les possibilités offertes par les filières de valorisation, les aspects techniques et juridiques liés à la valorisation (réemploi et recyclage), l'impact de la conception circulaire et les possibilités d'introduire le réemploi dans le processus de conception architecturale. L'étude vise aussi particulièrement à répondre au manque de données relatives au parc immobilier bruxellois, qui a été mis en évidence dans l'étude sur le métabolisme urbain. Le projet s'appuie sur une approche ascendante et l'identification de bâtiments types. Le projet développe une approche prospective pour anticiper l'état du gisement mais aussi les flux générés par la rénovation énergétique du bâti bruxellois.

Un outil est prévu pour 2021, qui permettra de simuler et de comparer jusqu'à 3 stratégies de rénovation énergétique différentes. L'encodage se fait à l'échelle du bâtiment, ce qui permet à l'utilisateur de choisir les combinaisons de murs améliorées pour un type de bâtiment donné. L'outil fournit alors les résultats suivants pour chaque stratégie : bilans matières, impacts en termes d'émissions de CO₂ et d'énergie intrinsèque, potentiel en termes de circularité (réemploi et recyclage). En combinant ces évaluations quantitative et qualitative, on peut extrapoler les résultats et modéliser ainsi l'impact de certaines stratégies à l'échelle urbaine.

À QUOI A ABOUTI CETTE ÉTUDE ?

Cette étude devrait être achevée au cours du premier semestre 2021. Elle n'a donc pas encore débouché sur des mesures concrètes en matière de politiques publiques et de planification urbaine. L'étude s'appuie toutefois sur les stratégies et les besoins attendus par la Région pour élaborer les scénarios. En anticipant les flux et en comparant les stratégies, cette étude pourrait aider à prendre des décisions en matière de gestion efficace des ressources et des déchets mais aussi pour le développement des politiques publiques de rénovation et d'économie circulaire.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTUDE : Approche ascendante, stock et flux, rétrospective et prospective. Le réemploi est inclus dans cette étude dans le cadre de l'évaluation qualitative.

19. Plus d'informations sur le projet BBSM sur : <https://www.bbsm.brussels/en/productions-en/>

LES GISEMENT URBAINS DE LA VILLE DE MELBOURNE, AUSTRALIE (2018)

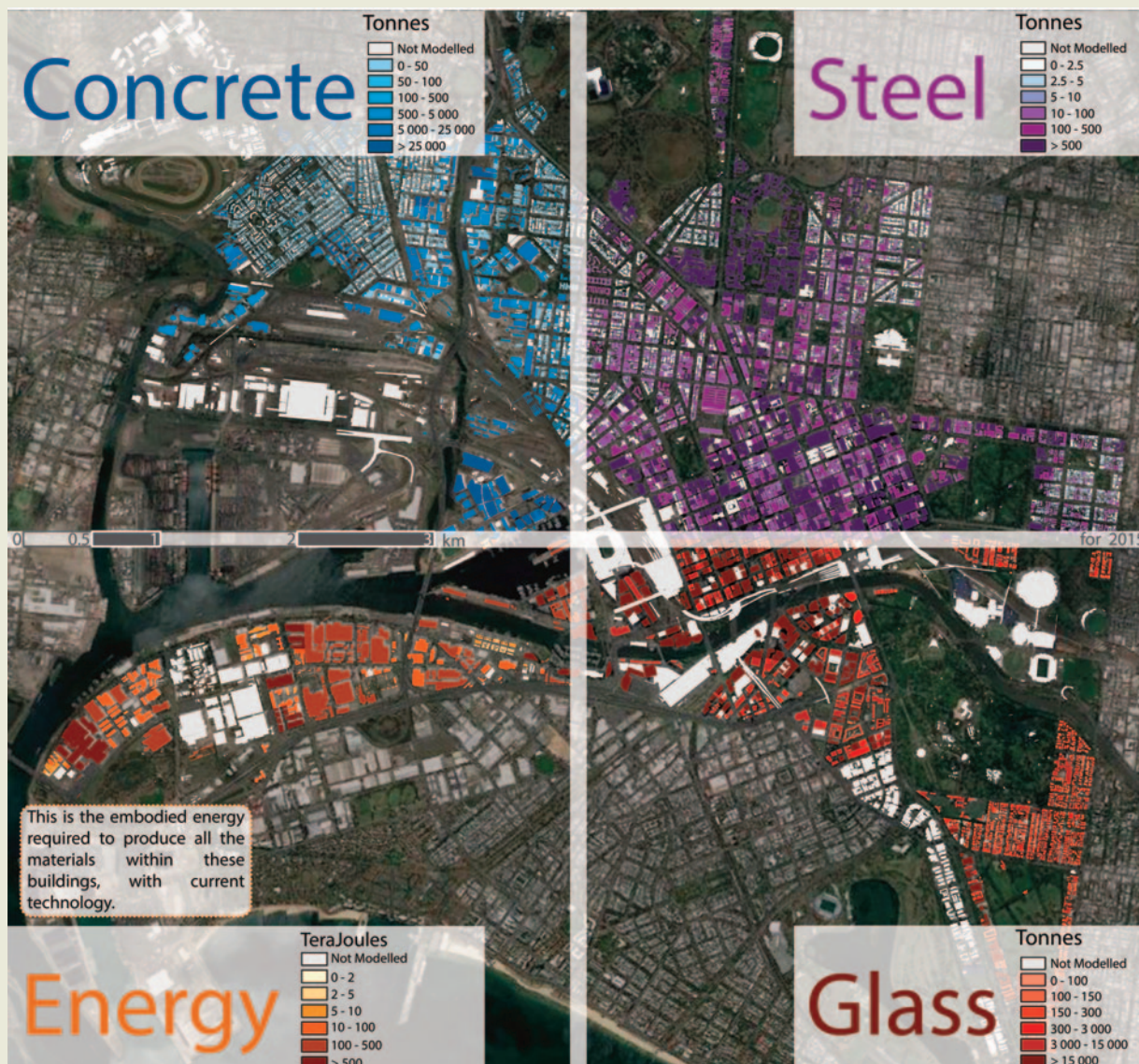


Figure 8 : Gisement de matériaux et énergie intrinsèque de la ville de Melbourne (reproduit avec la permission de A. Stephan, 2017) [21]

CONTEXTE

L'étude du bâti existant a constitué une étape préliminaire dans la poursuite de deux objectifs : évaluer les impacts environnementaux et estimer les flux de matériaux causés par le remplacement des matériaux non structurels à la fin de leur vie utile, de 2018 à 2030. La méthode proposée est basée sur une approche ascendante. Elle a défini 48 archétypes de bâtiments, ce qui a conduit à la modélisation de 13 075 bâtiments offrant une représentation spatiale des différents gisements urbains. Ceci a nécessité de collecter un ensemble de données relatives à l'occupation des sols, à l'empreinte au sol et la géométrie des bâtiments ainsi que des données relatives aux flux de matériaux embarqués (durée de vie, types de matériaux, unité fonctionnelle, etc.). Les résultats de ce modèle se déclinent de différentes manières : cartographie générale de l'intensité matérielle du gisement urbain ainsi que de l'énergie grise et des émissions de gaz à effets de serre correspondantes, focus sur des zones d'accumulation de certains types de matériaux spécifiques (plaque de plâtre, bois, aluminium, tapis, céramique, verre, acier, isolation), ou encore représentation d'une pyramide des âges des matériaux présents dans le gisement urbain selon leur durée de vie.

À QUOI A ABOUTI CETTE ÉTUDE ??

En 2020, cette étude n'a pas encore débouché sur des politiques ou des mesures prises directement par la ville de Melbourne ou le secteur de la construction dans l'État de Victoria ou en Australie. Contrairement à l'étude sur Bruxelles, celle de Melbourne n'a pas été financée par les pouvoirs publics, ce qui peut également expliquer pourquoi les conclusions ne sont pas directement prises en compte par les autorités locales. L'État de Victoria a récemment décidé de débloquer un budget pour le développement de l'économie circulaire²⁰, l'étude s'avérera utile dans ce contexte. En effet, ce type d'étude spatiale et temporelle présente un potentiel important en tant qu'outil d'aide à la décision et à la planification urbaine pouvant mener à une gestion plus responsable des gisements et des flux de matériaux. L'analyse permet d'identifier les principaux flux (en termes de quantité de matières) et d'anticiper les périodes de renouvellement intense. Un élément important à souligner et qui a facilité la réalisation de cette étude est l'existence et l'accessibilité des sets de données nécessaires, fournis en libre accès par la ville de Melbourne²¹.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTUDE : Approche ascendante, stock et flux, rétrospective et prospective. Le réemploi n'est pas directement visé dans cette étude.

20. Plus d'informations ici : <https://engage.vic.gov.au/circulareconomy>.

21. Plus d'informations ici : <https://data.melbourne.vic.gov.au>

GISEMENT ET FLUX DE MATIÈRES EN RÉGION ÎLE-DE-FRANCE, FRANCE (2021)

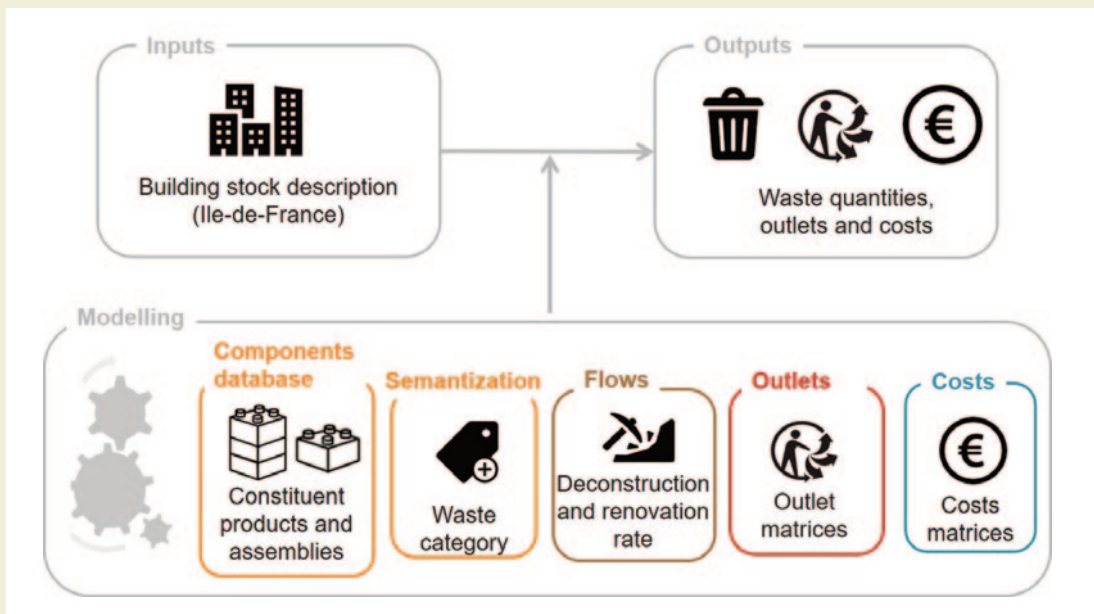


Figure 9 : BTP FLUX : structure modèle (source: CSTB, 2021)

CONTEXTE

Le BTP FLUX est une approche ascendante d'évaluation des gisements et des flux de matières appliquée à une échelle géographique expérimentale : la Région Île-de-France. Le modèle étudie cinq types d'usages (maison unifamiliale, logement collectif, bureaux, éducation et industrie) et s'intéresse aux flux de déchets liés à la rénovation et à la démolition de ceux-ci. Pour cette étude, 101 352 bâtiments ont été modélisés. La géométrie des bâtiments se base sur des informations géographiques. Les caractéristiques matérielles des bâtiments proviennent d'une base de données de macro-composants et d'assemblages (117 types existants). Chaque bâtiment est donc une combinaison de plus de dix macro-composants, ce qui offre une grande souplesse dans la description des bâtiments.

Des scénarios de rénovation et de démolition ont été élaborés pour estimer les déchets générés par chaque catégorie (par exemple : béton et pierre, plâtre, plaques et carreaux, céramique). Les déchets sont répartis en plusieurs filières (recyclage et réemploi, enfouissement en carrière, entreposage) selon des scénarios faisant la distinction entre les déchets triés en pied de chantier et les déchets mélangés. La modélisation inclut une estimation des impacts environnementaux et des coûts de traitement pour chaque filière. L'estimation se base sur une fourchette de prix reflétant l'hétérogénéité des situations. Une extrapolation des scénarios permet d'obtenir des résultats à l'échelle territoriale. Les principaux résultats sont présentés dans la figure 9.

À QUOI A ABOUTI CETTE ÉTUDE ?

La méthode développée ici pourrait être répliquée sur d'autres territoires et à différentes échelles pour : (1) anticiper les flux de déchets qui vont être générés par les opérations d'aménagement du territoire, (2) avoir une vision sur les filières courantes de valorisation des déchets (taux de valorisation, type de valorisation, impacts environnementaux et économiques), (3) comparer à l'échelle d'un territoire spécifique les flux de déchets générés et les besoins futurs en matériaux, (4) identifier les futurs flux de matériaux pour le développement de nouvelles solutions de réemploi et de recyclage.

CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTUDE : Approche ascendante, Description des macro-composants, Stock et flux, Prospective. Des scénarios de réemploi sont inclus dans cette étude.

Comparaison des différentes méthodes d'études du Métabolisme Urbain

Cette section s'appuie principalement sur plusieurs articles scientifiques déjà référencés dans le bref état de l'art ci-dessus²². Pour plus d'informations, n'hésitez pas à les consulter.

1. Approches

Il existe différentes méthodes et approches pour étudier les flux et les gisements de matériaux. Ces méthodes se concentrent sur les flux et/ou sur les gisements, l'estimation peut être basée sur une année de référence (statique) ou sur une échelle de temps plus longue (dynamique). Enfin, les études peuvent être menées de façon rétrospective ou prospective [9]. Ces différentes possibilités sont représentées ci-dessous. Ces approches peuvent être utilisées séparément ou en combinaison, ce qui est une façon de gérer l'incertitude. Par exemple, six grandes méthodes combinées sont identifiées par V. Augiseau à partir de 31 articles scientifiques portant sur l'étude des gisements et des flux : analyse statique des flux BU ou TD, analyse des gisements BU, analyse dynamique (rétrospective ou prospective) des flux à l'aide de modèles axés sur les flux ou les gisements, analyse des gisements TD (rétrospective ou prospective) à l'aide d'un modèle axé sur les flux.

Le choix de l'approche dépend de l'objectif poursuivi mais aussi de la qualité et de l'accessibilité des données, qui

varient fortement d'un pays, d'une région ou même d'une ville à l'autre [7]. En fonction de l'approche retenue, les résultats peuvent donc varier considérablement. Une méthode standardisée semble difficile à envisager à ce stade, bien qu'un travail d'harmonisation sur la définition des termes, les indicateurs et les approches méthodologiques serait souhaitable [9]. Plusieurs de ces approches sont expliquées ci-dessous (en plus des approches "statique vs dynamique" et "prospective vs rétrospective" déjà discutées précédemment).

En ce qui concerne le réemploi, plusieurs méthodes complémentaires peuvent être pertinentes :

- Méthode 1 : développer une approche ascendante à partir de bâtiments types afin d'évaluer certains gisements et leur réemploi potentiel.
- Méthode 2 : utiliser l'outil SIG pour spatialiser la répartition des éléments potentiellement réemployables sur un territoire.
- Méthode 3 : modéliser les flux ou la demande future ou en s'appuyant sur des indicateurs socio-économiques dans le but d'en déduire la stratégie d'intervention permettant la meilleure optimisation des ressources.

Approche descendante (TD) :

Ce type d'approche est principalement mis en œuvre dans les méthodes axées sur les flux et basées sur des données macroéconomiques ou agrégées. Les

22. [7] [3] [9] [10]

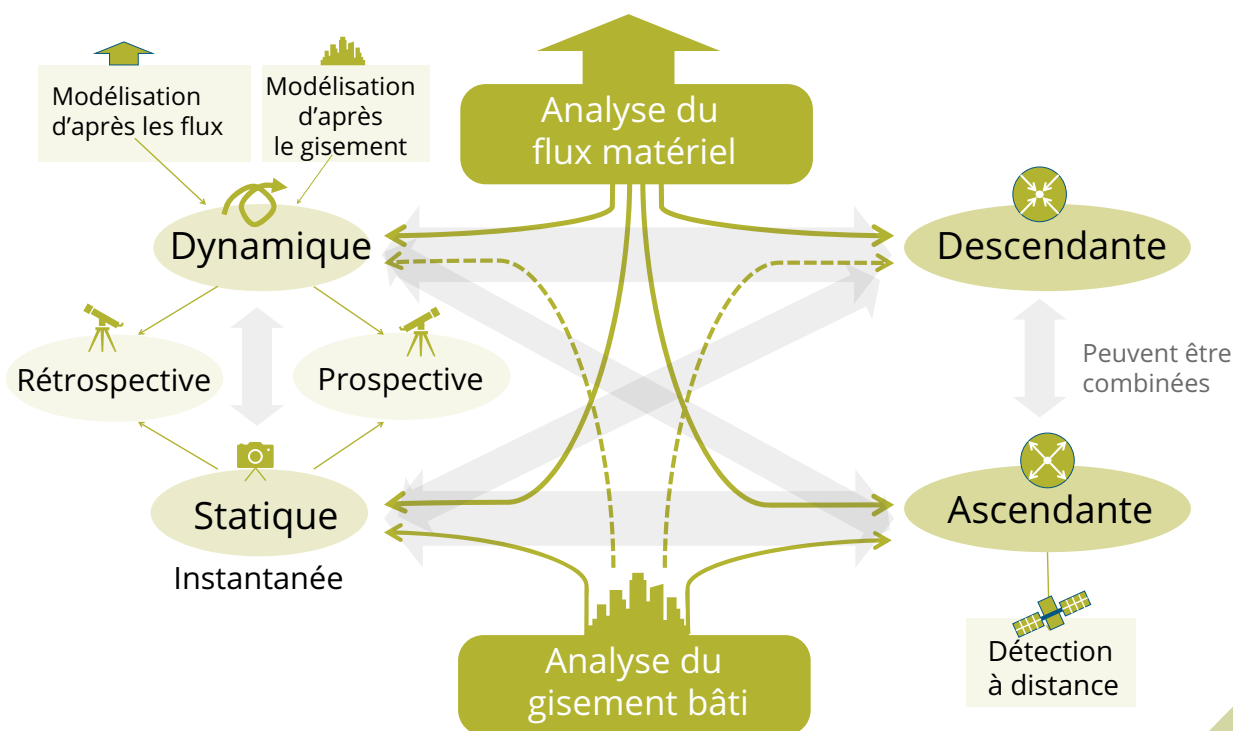


Figure 10 : Différentes approches pour l'analyse des stocks et des flux de matières : des combinaisons sont possibles

(Basé sur [7] and [9])

informations sur les flux entrants sont plus faciles à obtenir que les données sur les flux sortants, qui sont souvent le fruit d'une estimation. Des statistiques sont généralement disponibles au niveau national ou mondial mais peuvent entraîner un manque de précision quant à la qualité et à la localisation exacte des stocks par matériau à l'échelle urbaine. L'approche descendante est généralement la méthode utilisée dans les études sur le métabolisme urbain qui analysent les flux entrant et sortant. Les définitions de l'approche descendante pour l'AFM ont été données par Eurostat (2001). Les approches descendantes appliquées à l'analyse des stocks sont essentiellement des études dynamiques. La moitié d'entre elles sont rétrospectives, 10 % sont axées sur une approche prospective, le reste combine des approches rétrospectives et prospectives [7].

Approche ascendante (BU):

Ce type d'approche est basé sur les informations recueillies lors de l'**inventaire des gisements**. La collecte des données est donc relativement détaillée et exige beaucoup de travail mais elle permet d'obtenir des résultats précis sur la composition des gisements, leur intensité et leur distribution géographique. Toutefois, ce type d'approche tend également à réduire l'échelle et/ou la période analysée et n'élimine pas l'incertitude, notamment lorsqu'elle est appliquée à de vastes zones. La majorité des études ascendantes (69 %) se concentrent sur une caractérisation plutôt statique des stocks [7]. L'autre partie (31 %) opte pour une approche dynamique et analyse l'évolution des stocks dans le temps en compilant les résultats sur plusieurs années. Parmi les études dynamiques d'approches ascendantes, 50 % sont rétrospectives, 30 % sont prospectives et 20 % combinent les deux [7]. Les approches ascendantes utilisent généralement plusieurs moyens pour combler le manque de données relatives à l'inventaire des matériaux et à leur usage selon le type de bâtiment :



Classification du bâti existant en échantillons de différents **bâtiments types**, représentatifs d'un certain type d'usage et d'une certaine période. Plus l'échantillonnage des bâtiments types est représentatif, plus les résultats obtenus seront détaillés et proches de la réalité, notamment en ce qui concerne la composition (matériaux et éléments constitutifs) et les systèmes constructifs. Ce degré de précision requiert toutefois un travail intense pour collecter et traiter les



données, et ce sans nécessairement résoudre toutes les incertitudes²³.

Le **système d'information géographique (SIG)** est un outil qui utilise des données géospatiales offrant une plus grande précision dans la localisation des gisements de matériaux. Le SIG permet de tenir compte de caractéristiques telles que la fonction des bâtiments, leur empreinte, le nombre d'étages (parfois élevé) et leur année de construction. Celles-ci sont assez faciles à mettre en place. En revanche, des caractéristiques telles que l'intensité matérielle et la composition spécifique des bâtiments et des infrastructures ne sont pas encore incluses dans les bases de données SIG. Il est possible d'y remédier en utilisant des coefficients d'intensité matérielle définis à partir de l'analyse de bâtiments types. Ceci induit généralement des incertitudes quant à la géométrie de chaque bâtiment²⁴.



Les **spécifications géométriques** (hauteur, profondeur, largeur) relatives aux bâtiments sont donc importantes et nécessaires pour compléter les bases de données SIG. Celles-ci fourniraient des informations sur la morphologie, la composition et l'emplacement de leurs matériaux de construction constitutifs [13]. En outre, *il serait bon d'élaborer une nomenclature systématique des matériaux pour chaque bâtiment dans un pays afin de faciliter les études détaillées de la composition des stocks de matériaux de l'environnement bâti* [7, p.18].

L'approche ascendante est généralement basée sur des hypothèses quant à l'homogénéité de la composition des matériaux et la durée de vie en service des différents types d'ouvrages construits. Des études de cas et des approches croisées descendantes et ascendantes pourraient améliorer la fiabilité des estimations [9].

23. Certaines sources d'incertitudes sont : la manière dont les coefficients d'intensité matérielle (IM) sont définis, la manière dont sera utilisée cette typologie. Par exemple, uniquement les caractéristiques des matériaux appliquées aux caractéristiques géométriques du bâti existant ; à la quantité de bâtiments basée sur les coefficients IM et le pourcentage de surface construite basé sur chaque segment de parc de bâtiments.

24. Les incertitudes proviennent des différentes étapes d'un modèle d'AMF.

Modélisation axée sur les flux ou les stocks

L'analyse dynamique peut être basée soit sur les flux entrants, soit sur les gisements. Les modèles généralement appelés « modélisation axée sur les flux » ou « modélisation axée sur la demande » [14] peuvent être ascendants ou descendants. Ils combinent des données monétaires avec des données physiques sur les produits et les matériaux. Ils peuvent par exemple être basés sur une extrapolation des données relatives aux flux à une moyenne annuelle. Ainsi, la modélisation axée sur la demande utilise des indicateurs socio-économiques dépendant de la population pour modéliser le gisement urbain [3].

L'autre approche de l'analyse dynamique développe des modèles axés sur les gisements. Ces modèles partent du principe que le gisements et les « unités de service » sont le moteur des flux de matières. Dans ce contexte, plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour estimer le gisement : « modèle de développement » [...], « taux d'expansion du gisement » [...], population et mode de vie [15].

Approche par télédétection

Il existe une autre approche qui utilise des techniques de relevés à distance pour estimer les gisements de matériaux. Généralement combinée avec l'utilisation de SIG, cette approche est utilisée dans les territoires où la quantité de données disponibles est faible. En Chine, par exemple, plusieurs études ont eu recours à cette approche pour analyser le gisement de métal utilisé

dans les travaux de génie civil et les bâtiments [16] [17]. Elle peut être associée à une approche ascendante puisqu'elle est basée sur des données modélisées telles qu'un échantillon de bâtiments [3].

2. Collecte et traitement des données

Collecte de données

Le manque de données est souvent le principal obstacle à l'étude des stocks présents dans l'environnement bâti. Les données statistiques et macro-économiques sont généralement utilisées dans le cadre d'une approche descendante. En ce qui concerne les études ascendantes, les sources de données sont multiples et souvent croisées (registre cadastral, permis de construire, plans, mesures, spécifications, informations géospatiales, etc.). Les données relatives à l'âge de la construction, à l'emplacement, à l'utilisation et à la superficie au sol du bâtiment, parfois à sa hauteur et au nombre d'étages, sont généralement les principales informations recueillies. Elles sont usuellement utilisées pour définir des bâtiments types, c'est-à-dire des « familles » de bâtiments ayant les mêmes caractéristiques en termes de morphologie et de composition matérielle. Néanmoins, un manque de données précises persiste concernant la caractérisation de la composition matérielle de l'environnement bâti et son potentiel de réemploi et de valorisation. Fournir ce type d'informations (types de matériaux et d'assemblages, durée de vie, taux de perte, etc.) nécessite des

Tableau 1 : Outils utilisés dans les études sur le MU pour le traitement des données (basé sur [3] et [7])

AFM	Analyse des flux de matières	L'AFM vise à comptabiliser tous les flux entrants et sortants d'une zone géographique spécifique définie comme un système ²⁵ (villes, aire métropolitaine, région, pays...) et suivant les principes de la conservation de masse. C'est un outil utile pour modéliser spatialement et de façon dynamique des flux de matériaux [3] [18].
AMS	Analyse des stocks de matières premières	L'ASM vise à comptabiliser l'accumulation (et la composition) des gisements de matériaux (y compris les bâtiments et les infrastructures) d'une zone géographique spécifique définie comme un système.
ACV	Analyse du cycle de vie	L'ACV est utilisée pour évaluer les impacts environnementaux des produits, des processus, des bâtiments, des villes... elle peut être menée à différentes échelles et considère généralement les phases « du berceau à la tombe » [3].
SIG	Système d'information géographique	Le SIG est un outil qui est de plus en plus utilisé pour l'évaluation des gisements de matériaux. Comme il peut traiter et cartographier une très grande quantité de données (y compris les impacts du cycle de vie) à différents niveaux, il représente un instrument clé pour mieux comprendre la composition des gisements. Le SIG est nécessaire pour étudier la dynamique spatiale des gisements et des flux. [3]
EN	Éclairage nocturne	Cet outil produit des images qui sont disponibles pour le monde entier, sur plusieurs années. Il peut être utile pour analyser des zones à forte densité de population ou pour d'autres utilisations comme l'estimation du gisement de cuivre ou d'infrastructures. Néanmoins, cette technique ne donne pas d'informations solides sur le gisement (les résultats sont statiques) et présente des limites inhérentes (dues à la saturation de l'éclairage nocturne et à l'effet d'échelle). Il doit être interprété avec précaution [7].

25. Elle peut également être menée à l'échelle des entreprises, des industries ou du zonage industriel, mais elle fait moins l'objet de cette publication et reste du ressort des démarches d'écologie industrielle

connaissances en architecture qui font actuellement défaut dans les études existantes [7]. En Europe, les pays et les villes ne compilent pas de statistiques systématiques sur le réemploi des matériaux, ce qui rend difficile l'exploitation de ces données et peut expliquer l'absence relative de considérations sur le réemploi dans le corpus d'études sur le MU. En outre, certaines données utiles pour l'étude du réemploi à plus grande échelle pourraient être exploitées si les inventaires réemploi²⁶ étaient intégrés dans les procédures administratives liées à un projet et si les méthodes de comptage étaient harmonisées.

Traitement des données

Plusieurs types d'outils sont utilisés pour le traitement des données dans les études sur le MU. Ils peuvent être utilisés séparément ou en combinaison. Le tableau de la page précédente présente ces principaux outils.

Il faut toutefois noter que les analyses de gisement ont tendance à reposer sur une approche ascendante, notamment par la définition de bâtiments types. Dans ce cas, la collecte et le traitement des données nécessite un travail important avant de comprendre la composition de ces gisements et la façon dont ils se sont constitués au fil du temps. En l'absence de données statistiques consolidées, le travail sur le réemploi dans l'analyse des gisements urbains nécessitera très probablement ce type d'approche.

26. Par exemple, voir https://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en et le *Guide pour l'identification du potentiel réemploi des matériaux de construction*, produit par Interreg FCRBE (2021).

3. Limites géographiques

L'étendue géographique et territoriale des études sur les gisements urbains est variable. Elles peuvent être menées au niveau d'un quartier, d'une ville, d'une région, d'un pays ou d'entités géopolitiques et géographiques plus importantes. Actuellement, la majorité des études existantes se concentrent sur une échelle nationale²⁷. Environ un tiers est réalisé à l'échelle urbaine et plus d'un dixième à une plus grande échelle (internationale). Les études sur les gisements urbains au niveau régional sont moins nombreuses. Les échelles les moins représentées sont généralement celles des quartiers et des bâtiments [7]. Les études montrent souvent que l'intensité massique du gisement de matériaux de construction (kt/km²) est plus élevée au niveau urbain qu'à l'échelle nationale ou régionale. Cela s'explique par le fait que les villes sont plus densément peuplées et bâties que les zones rurales. De même, la concentration est également plus élevée dans les économies développées que dans les économies en développement, tant au niveau national qu'au niveau urbain. En fonction de l'étendue géographique, de la disponibilité et de la qualité des données, les études peuvent présenter différents niveaux de résolution [7].

27. MPlus de la moitié selon les 250 études passées en revue par Lanau et.al. [7]

Tableau 2 : Stock de matières premières par mètre carré et par habitant : différences entre les échelles nationales et urbaines (basé sur [7])

Niveau national	Niveau de la ville	Stock de matières premières au km carré [kt/km ²]	Stock de matières premières par habitant [t/cap]
Autriche		20	
	Vienne	1000-1200	200-300
Japon		100	
	Wakayama	+/- 1000	200-300
États-Unis		10	
	Philadelphie (sur 2,6km ²)	1400	
Chine	Moyenne des villes étudiées (pour 2012, 2013)		< 50

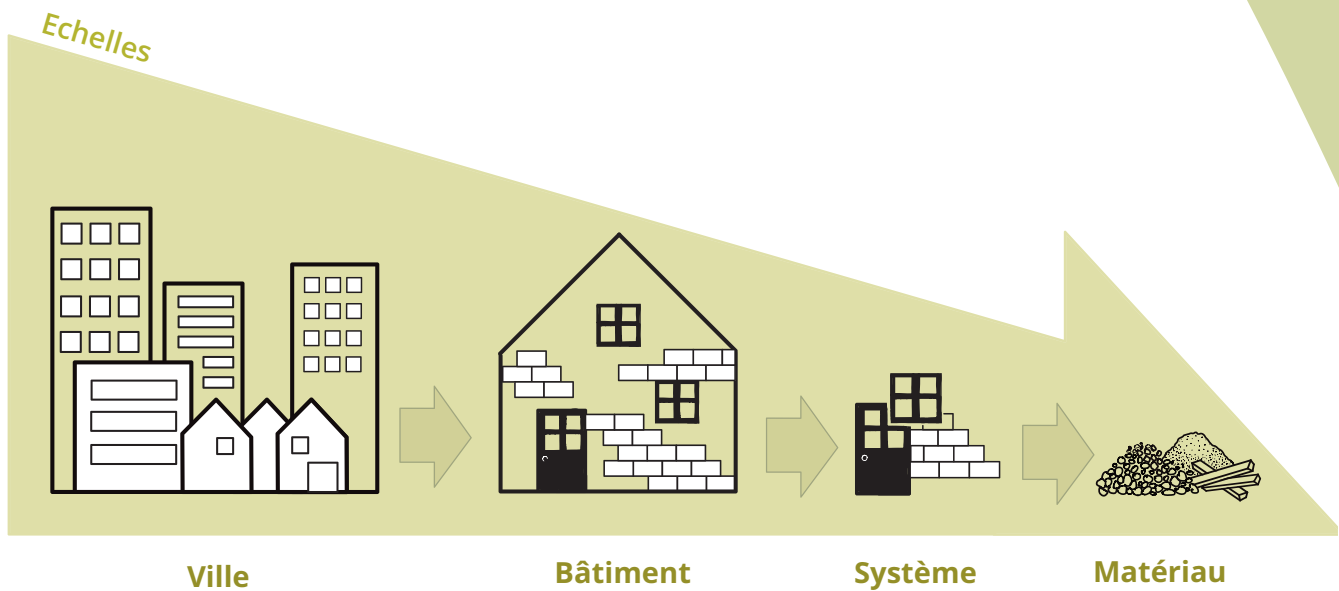


Figure 11: Échelles d'analyse

Échelles d'analyse

Comme pour l'approche globale de modélisation, l'échelle de l'analyse est également variable. L'accent peut être mis sur un matériau ou même une substance ainsi que sur des produits, des composants, des éléments jusqu'à un bâtiment ou une infrastructure entiers. Ces différentes échelles peuvent également être combinées. En ce qui concerne le réemploi, les études doivent prendre en compte au moins l'échelle des produits ou des éléments de construction.

En ce qui concerne les analyses menées à l'échelle des **bâtiments**, certaines approches ascendantes étudient la répartition des différents types de bâtiments dans les zones urbaines pour caractériser leur composition matérielle [19] [13]. Cette dernière est parfois difficile à établir avec précision. Elle nécessite généralement un temps de travail accru et une connaissance historique des matériaux et des techniques constructives. Les bâtiments résidentiels sont souvent plus représentés dans les études ascendantes que les bâtiments non résidentiels. Ceux-ci sont en effet plus diversifiés du point de vue des fonctions et de leur composition matérielle, ce qui rend la collecte de données plus complexe [7]. Par contre, le taux de renouvellement du bâti résidentiel est souvent inférieur à celui des immeubles de bureaux ou commerciaux. Par conséquent, le type de fonction et d'usage influencerait la dynamique des flux et leur évolution dans le temps. En ce qui concerne l'**infrastructure**, elle est généralement liée à l'organisation spatiale urbaine. La proportion d'infrastructures dans l'environnement bâti sera plus faible dans les zones densément bâties. La fraction des gisements souterrains de matériaux ne doit

pas être négligée (fondations, parkings souterrains, infrastructures de transport, réseaux, etc.) [7].

Les études existantes analysent et discutent moins l'échelle des **éléments de construction** et des composants [19] [13]. La quantification est plus souvent effectuée pour des matériaux d'une nature spécifique ou regroupés par type. Cependant, les éléments de construction peuvent être composés de différents types de matériaux (c'est par exemple le cas pour des fenêtres, des portes, des installations sanitaires...), ce qui peut complexifier la façon de les quantifier dans les études sur le MU. C'est pourtant précisément l'échelle des éléments de construction qui est adéquate au cadre du réemploi. Certaines études existantes se concentrent déjà sur des éléments de construction spécifiques présentant un potentiel de réemploi en raison de leur rareté (caractère historique, patrimoine, édition limitée, design) ou de leur abondance relative, ainsi que de l'existence d'un marché et/ou d'une demande²⁸. Par exemple, une étude menée à Toronto examine les gisements de briques en terre cuite présentes dans les maisons individuelles afin d'en tirer des informations utiles pour mettre en place des logiques de réemploi et de recyclage à l'échelle de la ville. L'étude montre qu'en moyenne 2 523 à 4 542 m³ de briques pourraient être

28. Concernant le marché du réemploi, il peut être intéressant de se référer au catalogue en ligne développé dans le cadre du projet FCRBE qui présente une sélection de produits récupérés largement disponibles dans le secteur du réemploi et adaptés aux projets de grande envergure. Ce catalogue permet déjà d'identifier les éléments de réemploi courants sur le marché ainsi que leurs principales caractéristiques techniques. Les annuaires d'entreprises spécialisées dans la vente de matériaux de construction de réemploi Opalis (<https://opalis.eu/en>) et Salvoweb (<https://www.salvoweb.com/>) sont également une source d'information utile.

réemployées chaque année, soit 20 et 36 % du volume de briques neuves utilisées pour la construction de nouvelles maisons en 2012. Le potentiel de réemploi estimé est inférieur au potentiel de recyclage (6 187 m³) principalement en raison de l'utilisation du mortier de ciment, qui rend la récupération des briques plus difficile [20].

Les études sur les gisements urbains de matériaux peuvent concentrer leurs analyses sur des matériaux ou des produits spécifiques, sur un ensemble de matériaux définis et différenciés ou sur des résultats agrégés pour un ensemble de matériaux tels que les matériaux « métalliques » et « non métalliques », les « minéraux » et les matériaux « non minéraux » ou plus généralement les « matériaux de construction ». Une telle approche est cependant plus adaptée aux logiques de recyclage.

Comme mentionné précédemment, les études portant sur les métaux sont assez nombreuses, suivies par les études portant sur les ressources minérales. Les matériaux les plus fréquemment analysés sont l'acier, le cuivre et l'aluminium mais aussi le béton et le bois. Les études portant sur un seul matériau sont moins fréquentes. Outre les matériaux les plus couramment étudiés déjà mentionnés, certains se concentrent par exemple sur les plastiques, le ciment, l'argile ou d'autres types de métaux tels que le zinc, le plomb et le fer [7]. Les autres types de matériaux ne sont pas représentés de manière aussi régulière. Les études ont tendance à combiner plusieurs matériaux dans une même analyse.

Unités

Plusieurs unités de mesure peuvent être utilisées pour quantifier les gisements urbains. Le choix dépend de

l'échelle de l'analyse, du type de données disponibles, de l'objet et du but de l'étude. En ce qui concerne le réemploi, une quantification par éléments de construction semble la plus appropriée. Comme les éléments peuvent être composés de différents matériaux assemblés pour former une seule entité (par exemple, une fenêtre avec un cadre en bois, en aluminium ou en PVC et un vitrage en verre), les unités les plus utilisées seront relatives à la surface, au nombre de pièces, aux mètres linéaires ou même au volume.

Toutefois, à l'heure actuelle, les études existantes sur le MU ont tendance à ne considérer presque que la masse comme unité de mesure (y compris dans ses dérivés, telles que la masse/habitant, la masse/m², etc.). Cela permet une comparaison plus facile entre les études [7] mais ce n'est pas nécessairement l'unité la plus adaptée aux spécificités du réemploi. Elle peut par exemple induire à une sous-représentation de fractions clés telles que les matériaux isolants, légers mais volumineux et de plus en plus fréquemment mis en œuvre pour répondre aux exigences de performance énergétique [4] [19].

Enfin, la valeur socio-économique des éléments est rarement abordée dans les études existantes. Elle est pourtant particulièrement utile pour analyser l'impact des logiques d'*urban mining* et de l'économie circulaire. En outre, en ce qui concerne le réemploi, certains indicateurs socio-économiques (nombre d'emplois créés, valeur de revente, etc.) doivent être considérés en complément de la masse, largement utilisée dans les études sur le MU. Une estimation des masses de matériaux réemployés reste malgré tout utile pour évaluer les bénéfices environnementaux correspondants.

Tableau 3 : Différentes unités selon l'échelle de l'analyse

v Echelle	Unité	Masse (kg, tonne)	Linéaire (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	Pièces (#)
Matériau		X			(X)	
Produits			X	X		X
Composant/ Éléments			X	X		X
Bâtiments				X	(X)	X
Unité dérivée / Indicateurs		masse/m ²			m ³ /m ²	
(analyse à plus grande échelle)		masse/habitant		m ² /habitant	m ³ /habitant	

4.

Opportunités et limites

Les études sur le MU sont précieuses pour améliorer la gestion des ressources grâce à une meilleure compréhension des gisements de matériaux présents dans l'environnement bâti. Pour les pouvoirs publics, elles permettent d'étayer des décisions stratégiques et réglementaires : amélioration des politiques de gestion des déchets, promotion des pratiques de réemploi, anticipation des opérations d'aménagement urbain, etc. Pour les acteurs économiques, notamment dans le secteur de la construction, elles rendent visibles des opportunités de développement : création de filières de valorisation (par des tiers ou par les producteurs de matériaux eux-mêmes), mise en œuvre de nouvelles pratiques de démolition sélective (pour les démolisseurs), choix constructifs facilitant la valorisation ultérieure des bâtiments (pour les investisseurs et les concepteurs), etc. Cependant, les études sur le MU ont également des limites.

Un domaine de recherche émergent

Le domaine des recherches sur le MU est encore relativement récent et nécessite une meilleure harmonisation de la terminologie et des méthodes. En outre, malgré le développement croissant des études sur le MU, peu d'entre elles semblent avoir déjà donné lieu à des politiques concrètes²⁹ notamment en ce qui concerne l'augmentation des pratiques de réemploi, ainsi que leur influence et leur intégration dans la planification urbaine. L'étude du réemploi à l'échelle urbaine peut donc à première vue sembler difficile ou pas nécessairement importante. Le fait qu'il s'agisse d'une pratique encore sous-exploitée, souvent réalisée à l'échelle d'un projet de manière ponctuelle et non systématique, peut également expliquer ce manque d'intérêt.

L'une des principales lacunes pour intégrer le réemploi des matériaux de construction dans les études sur le MU est le manque de connaissance quant à la composition matérielle de l'environnement bâti. Ces connaissances

doivent être axées sur la nature, la quantité et la disponibilité des matériaux et des composants et non sur les grandes fractions de déchets sortants. En outre, les caractéristiques des matériaux sont également essentielles (notamment en matière de résistance structurelle) en raison des exigences et des normes techniques (sécurité, confort, performance thermique ou structurelle). Or, ces informations ne sont pas faciles à obtenir. Des études en laboratoire sont parfois nécessaires pour obtenir des données précises et sont souvent menées sur des éléments spécifiques et dans le contexte d'un projet donné. Néanmoins, dans la mesure où elles participent de manière significative aux stratégies de l'économie circulaire, il serait intéressant de développer davantage d'études sur le MU intégrant le réemploi.

En ce sens, l'**approche ascendante** peut être plus adaptée aux spécificités des éléments de construction de réemploi : en partant de bâtiments types et de leur caractérisation sous l'angle du réemploi (types de matériaux et techniques constructives...) ou en l'abordant à travers l'analyse des mono-flux (des produits spécifiques présents sur le marché du réemploi, tels que les briques de terre cuite par exemple). Le croisement de cette méthode avec une approche descendante pourrait également réduire les incertitudes. Le développement croissant des stratégies d'économie circulaire devrait encourager la réalisation de nouvelles études visant à relever les défis et les obstacles rencontrés par les méthodes actuelles, et le réemploi a un rôle clé à jouer dans ce contexte³⁰.

Un domaine de recherche gourmand en données

Les études sur le MU dépendent fondamentalement de données souvent difficiles à obtenir (en termes d'accessibilité, de fiabilité, de qualité). En particulier parce que certains flux importants ne sont pas monitorés de manière systématique et harmonisée.

29. Même si certaines études, principalement sur le métabolisme urbain et l'écologie industrielle, commandées notamment par les pouvoirs publics, ont pu conduire à la mise en œuvre concrète de mesures (comme celles présentées au point 3. Travaux existants sur l'étude des gisements urbains

30. Ce sujet est développé dans le livret *Construire une feuille de route : stratégie pour encourager le réemploi dans le secteur de la construction* de la collection futuREuse (par Emilie Gobbo pour Bruxelles Environnement, 2021), publié dans le cadre du projet Interreg FCRBE

C'est notamment le cas pour les filières de réemploi. À l'exception de quelques initiatives telles que le BigREC mené par Salvo au Royaume-Uni³¹ et les travaux statistiques réalisés dans le cadre du projet FCRBE³², les États membres en Europe ne compilent pas de statistiques systématiques sur le réemploi des matériaux de construction. L'accès à des données centralisées serait pourtant essentiel pour faciliter leur réemploi (et dans une moindre mesure leur recyclage). En pratique, les matériaux de construction récents sont déjà documentés, notamment dans des fiches techniques, des déclarations de performance des produits de construction soumises au RPC (Règlement Produits de Construction)³³, des catalogues des producteurs, etc. Cette documentation est elle-même déjà exploitée (notamment via les plans "as built" et les dossiers d'interventions ultérieures, les registres cadastraux, les permis de construire, etc.). Mais à ce jour ces sources de données demanderaient à être restructurées pour qu'elles soient utiles à des fins d'analyse statistiques. Ceci pose toutefois des questions de confidentialité et de sécurité relatives à la gestion et l'accès à ces données.

De manière complémentaire, le développement et l'encouragement de « nouveaux » outils tels que les inventaires pré-démolition et de réemploi, les passeports matériaux, etc. est également pertinent. La difficulté réside donc plutôt dans l'optimisation du processus de documentation, la systématisation et la centralisation de l'information. La question de savoir s'il est nécessaire d'aller jusqu'à fournir un passeport pour identifier les matériaux est une autre question. Même si l'intention fondamentale des passeports de matériaux est d'assurer la transmission d'informations mises à jour, le risque est qu'ils puissent conduire au développement d'une certaine dualité sur le marché des matériaux : d'une part les matériaux qui ont un passeport (et peuvent donc circuler librement) et d'autre part ceux qui n'en ont pas (et sont simplement exclus ou rejetés en marge). L'utilisation de matériaux de réemploi pourrait en être compromise, ce qui irait à l'encontre du résultat recherché. De plus, la non-homogénéité des gisements de matériaux, leur nature diffuse combinée à l'imprévisibilité de la demande et de l'accès à ces gisements sont des défis à relever pour le développement du marché des éléments de construction de réemploi.

La nécessité d'intégrer les acteurs

La comptabilisation des flux n'est pas suffisante pour assurer l'optimisation de la gestion des ressources à l'échelle urbaine. Les organisations territoriales et les

décideurs actifs à différentes échelles (gouvernement, entreprises, associations, citoyens) prennent les décisions qui déterminent réellement la façon dont circulent les flux de matériaux. Une étude complémentaire des acteurs qui gèrent et consomment ces flux de matériaux est donc indispensable pour assurer la transition des villes vers plus de circularité. Il semble essentiel de mobiliser ces acteurs autour de la question de la gestion efficace des ressources, notamment en les informant sur l'utilité (et les limites) des études sur le MU (telles que celles mentionnées dans le présent rapport) et en les sensibilisant aux opportunités que représente le réemploi dans ce contexte. Une meilleure connaissance de la composition des gisements urbains de matériaux aurait des avantages multiples pour de nombreux acteurs de la chaîne de valeur. Dans ce contexte, la gouvernance semble essentielle pour mettre en œuvre des stratégies de l'économie circulaire.

Enfin, il est clair que les études sur le MU peuvent inspirer des méthodes et des approches qui peuvent être utilisées pour quantifier et caractériser des lots de matériaux susceptibles d'être rencontrés aujourd'hui et dans un avenir proche. Toutefois, si ces outils sont nécessaires, ils ne se suffisent pas à eux seuls. Pour une bonne évaluation du potentiel de réemploi, que ce soit à l'échelle d'un bâtiment ou, a fortiori, d'une ville, ces approches doivent être couplées avec des notions d'histoire de l'art et de l'architecture, une bonne connaissance de l'évolution des techniques de construction et en économie, associée à une bonne compréhension des spécificités du marché et des pratiques de réemploi.

Il est également important d'identifier les paramètres qui peuvent influencer :

- les gisements de matériaux urbains (leviers économiques, techniques, réglementaires, etc.)
- les interrelations au sein du stock
- les enjeux énergétiques (efficacité énergétique, énergie grise) et leurs implications environnementales.

En fin de compte, ces études sur l'environnement bâti pourraient conduire à l'élaboration d'indicateurs de durabilité et de circularité et participer activement à la mise en œuvre d'une politique de développement urbain durable, circulaire et économe en ressources [7].

31. L'enquête BigREC est une enquête commerciale menée par Salvo sur le secteur des matériaux de construction récupérés.

32. Voir l'analyse statistique réalisée dans le cadre du projet Interreg FCRBE.

33. Plus d'informations ici : https://ec.europa.eu/growth/sectors/construction/product-regulation_en.

5.

Le réemploi des gisements urbains ?

Si l'on se réfère au concept de MU, la ville peut être considérée comme une accumulation de ressources, disposées et assemblées de façon à former des bâtiments, des routes et des réseaux. Cette « accumulation » peut être considérée comme une série de couches résultant de constructions, de démolitions et de reconstructions successives, dont certaines traces anciennes sont conservées. En soi, l'idée n'est pas nouvelle³⁴. Le terme « palimpseste » a été introduit dans les domaines de l'architecture et de l'urbanisme à la fin des années 1970 pour illustrer ce processus : lorsque les villes et les bâtiments sont modifiés et redessinés, des traces de leur vie passée subsistent (en filigrane ou de manière visible). Néanmoins, dans cette analogie avec le parchemin dont on « gratte » la couche superficielle pour obtenir un nouveau support d'écriture, on ne retrouve pas la dimension relative à la possibilité que les éléments ainsi enlevés puissent être récupérés et valorisés.

En pratique, les études sur le MU visent à analyser la nature dynamique de l'évolution des villes, y compris des bâtiments. Envisager la ville comme un réservoir de matériaux suppose de considérer que les différentes couches et éléments constitutifs des bâtiments puissent conserver une certaine valeur, ce qui permet de les réemployer et de les réintroduire dans un nouveau cycle. C'est incontestablement ce qui distingue l'approche du MU des théories et analogies précédentes. Le défi consiste donc, d'une part, à trouver comment les bâtiments et leurs éléments constitutifs peuvent être maintenus le plus longtemps possible et utilisés au fil de transformations successives mais aussi, d'autre part, à éviter qu'ils ne soient dévalués. En effet, *une réduction de l'utilisation des matériaux serait plus facilement réalisée par une stabilisation des stocks existants et un effort pour prolonger la durée de vie des infrastructures et des*

bâtiments en place. Les résultats préliminaires pour les routes européennes suggèrent que ces stocks sont un moteur important de l'utilisation des ressources, et leur entretien et leur expansion nette doivent être considérés de manière critique [12, p.12].

En ce sens, le cadre de pensée proposé par l'économie circulaire, et qui est généralement sous-jacent dans le domaine du MU, est prometteur. Il propose en effet une transition vers une économie où les pratiques d'entretien, de maintenance et de réparation et les efforts visant à prolonger la durée de vie des ressources existantes deviennent générateurs de valeur. De ce point de vue, parce qu'il implique une transformation profonde des matériaux et ne permet pas de prolonger leur durée de vie utile, le recyclage des matériaux de construction devrait être considéré comme un « second choix » par rapport au réemploi. Des initiatives se multiplient pour relever les défis liés aux objectifs ambitieux du modèle proposé par l'économie circulaire. Par exemple, il existe déjà des acteurs qui contribuent à prolonger la durée de vie des matériaux de construction en les récupérant lors de travaux de démolition ou de transformation des bâtiments. Par analogie, ils correspondent en quelque sorte aux « prospecteurs » de la « mine urbaine ». Leurs pratiques peuvent déjà nous en apprendre beaucoup sur la manière dont certains « gisements » sont d'ores et déjà identifiés et exploités.

Cependant, bien que les pratiques de réemploi soient encouragées par le modèle circulaire, il faut noter que :

- de nombreux éléments de construction réemployables échappent à la prise en charge par ces « prospecteurs » pour des raisons telles que l'absence d'identification systématique des lots réutilisables, les impératifs de rendement des chantiers de démolition sur site (temps et budget), le recours croissant à des processus largement mécanisés (qui défont toute concurrence comparative en termes de coûts de main-d'œuvre), la perte générale d'une culture du réemploi, etc.

34. Léon Krier a déjà défendu l'idée des villes comme une « accumulation » dans les années 1970. En matière d'urbanisme, André Corboz a proposé la métaphore du palimpseste dans son texte de 1983 « le territoire comme palimpseste ». Cette expression est également utilisée dans l'analyse de l'architecture du paysage.

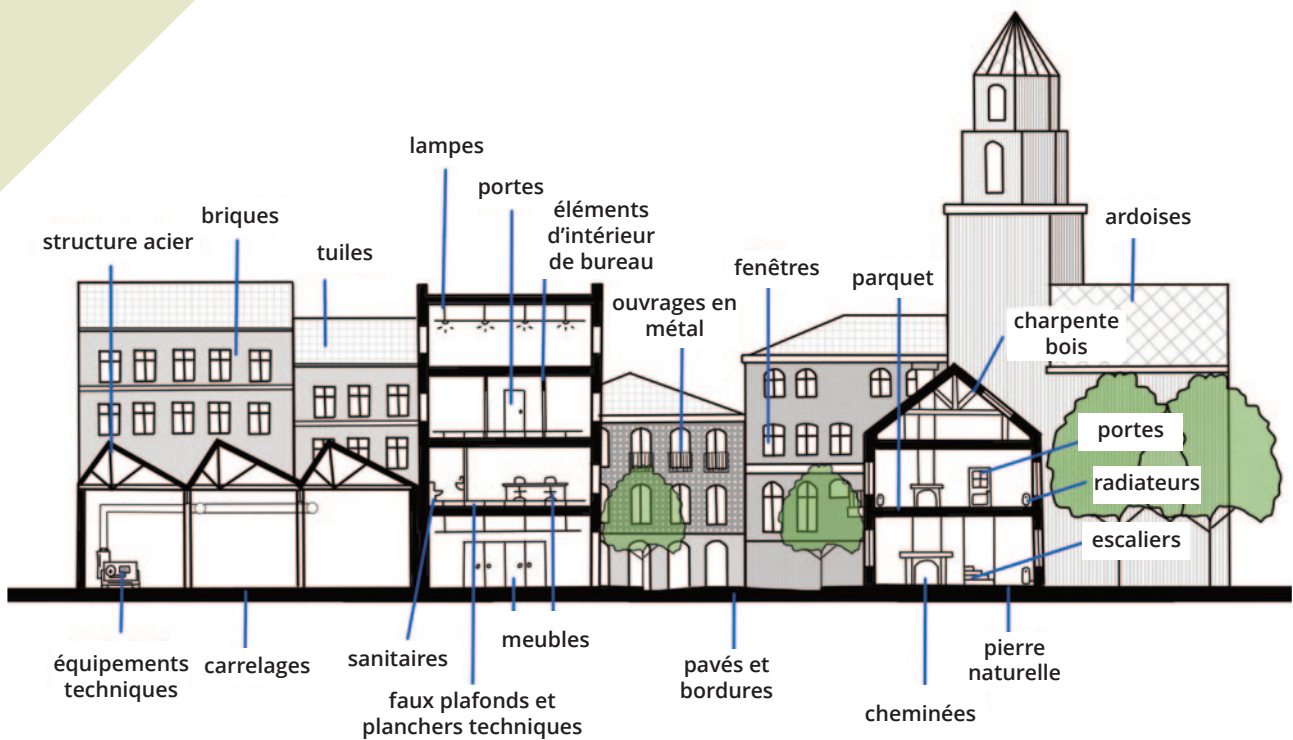


Figure 12 : Prospection des matériaux réutilisables présents dans la ville

- toutes les fractions potentiellement réemployables présentes dans le « gisement urbain » ne sont pas réemployées dans les faits. Diverses explications peuvent justifier ce phénomène, la question de la rentabilité étant évidemment prédominante (démantèlement trop coûteux, nouveaux matériaux équivalents comparativement trop peu coûteux, travaux de préparation importants, etc.) ainsi que des considérations plus techniques (risques de contamination, mise en œuvre et démantèlement destructifs, etc.).

Les pratiques de réemploi portent sur des ressources matérielles locales, qui sont « abondantes » et déjà fabriquées, et dont la récupération nécessite des ressources humaines qui ne peuvent pas être délocalisées. Compte tenu des opportunités qu'elles représentent en termes de circularité, il est donc évident que le potentiel offert par les logiques de réemploi est sous-estimé et sous-exploité. De plus, le réemploi peut facilement être combiné avec d'autres approches de valorisation telles que le recyclage. En ce sens, les études sur le MU pourraient aider à identifier de nouvelles opportunités et soutenir des politiques publiques

ambitieuses pour promouvoir le réemploi, notamment par la définition d'objectifs de réemploi et le suivi des efforts et des réalisations dans ce sens (et alimenter les données statistiques). D'une certaine manière, cela pourrait relancer une culture du réemploi et soutenir l'effort de transition vers des principes de circularité.

Enfin, cette perspective s'inscrit dans la lignée des ambitions de la Commission européenne, qui entend revoir les objectifs de valorisation des matériaux fixés par la législation européenne pour les déchets de démolition et de construction d'ici 2024. La mise en œuvre de mesures visant à soutenir et à développer des plateformes de réemploi et de recyclage pour dynamiser le marché intérieur des matières premières secondaires est également l'un des axes poursuivis par la Commission dans sa stratégie de rénovation. En plus de viser à doubler le taux de renouvellement, cette stratégie fait le lien avec l'intégration des principes de l'économie circulaire dans la conception des bâtiments et le protocole de l'UE sur la gestion des déchets de construction et de démolition [6].

Bibliographie

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, *The World's Cities in 2018 – Data Booklet (ST/ESA/SER.A/417)*, 2018.
- [2] Newell, Joshua & Cousins, Joshua, *The boundaries of urban metabolism: Towards a political-industrial ecology - Progress in Human Geography* (12. 1–27), 2014.
- [3] Göswein, Verena & Silvestre, José & Habert, Guillaume & Freire, Fausto, *Dynamic Assessment of Construction Materials in Urban Building Stocks: A Critical Review*, published in *Environmental Science & Technology*. 53. 10.1021/acs.est.9b01952, 2019.
- [4] E. Gobbo, *Déchets de construction, matières à conception : analyse des stocks et flux de matières dans le cadre des opérations de rénovation énergétique en Région de Bruxelles-Capitale*, Presses Universitaires de Louvain (PUL). ISBN 978-2-87558-434-2, 2015.
- [5] E. Gobbo, S. Trachte, C. Massart, *Influence of energy retrofit on material flows: comparison between various strategies*, published in *Journal of Physics: Conference Series* (Print), Vol. 1343, no. 012175, p. 6 (20 9). 10.1088/1742-6596/1343/1/012175, 2019.
- [6] European Commission, *Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Renovation Wave for Europe – greening our buildings, creating jobs, improving lives*, COM (2020) 662 final, 2020.
- [7] M. Lanau, G. Liu, U. Kral, D. Wiedenhofer, E. Keijzer, C. Yu, C. Ehlert, *Taking Stock of Built Environment Stock Studies: Progress and Prospects*, published in *Environmental Science & Technology*. 53. 10.1021/acs.est.8b06652, 2019.
- [8] A. Kapur, T. Graedel, *Copper Mines Above and Below the Ground*, published in *Environmental Science & Technology*. 40. 3135–41. 10.1021/es0626887, 2006.
- [9] V. Augiseau, S. Barles, *Studying construction materials flows and stock: A review*, published in *Resources, Conservation and Recycling*. 123. 10.1016/j.resconrec.2016.09.002, 2006.
- [10] H. Tanikawa, T. Fishman, K. Okuoka, K. Sugimoto, *The Weight of Society Over Time and Space: A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan, 1945–2010: The Construction Material Stock of Japan*, published in *Journal of Industrial Ecology*. 19. 10.1111/jiec.12284, 2015.
- [11] T. Fishman, H. Schandl, H. Tanikawa, P. Walker, F. Krausmann, *Accounting for the material stock of nations*, published in *Journal of Industrial Ecology* 18(3): 407–420, 2015.
- [12] D. Wiedenhofer, J. Steinberger, N. Eisenmenger, W. Haas, *Maintenance and Expansion: Modeling Material Stocks and Flows for Residential Buildings and Transportation Networks in the EU25*, published in *Journal of Industrial Ecology*. 10.1111/jiec.12216, 2015.
- [13] A. Stephan, A. Athanassiadis, *Quantifying and mapping embodied environmental requirements of urban building stocks*, published in *Building and Environment*. 114. 10.1016/j.buildenv.2016.11.043, 2017.
- [14] T. Fishman, H. Schandl, H. Tanikawa, *The socio-economic drivers of material stock accumulation in Japan's prefectures*, published in *Ecological Economics* 113: 76–84, 2015.
- [15] M. Hu, E. Van Der Voet, G. Huppes, *Dynamic material flow analysis for strategic construction and demolition waste management in Beijing*, published in *Journal of Industrial Ecology* 14(3): 440–456, 2010.
- [16] H. Liang, H. Tanikawa, Y. Matsuno, L. Dong, *Modeling In-Use Steel Stock in China's Buildings and Civil Engineering Infrastructure Using Time-Series of DMSP/OLS Nighttime Lights*, published in *International Journal of Remote Sensing*, 6. 4780–4800. 10.3390/rs6064780, 2014.
- [17] F-C. Hsu, C. Elvidge, Y. Matsuno, *Exploring and estimating in-use steel stocks in civil engineering and buildings from night-time lights*, published in *International Journal of Remote Sensing*. 34. 490–504. 10.1080/01431161.2012.712232, 2013.
- [18] Eurostat (European Statistical Office), *Economy-wide material flow accounts and derived indicators: A methodological guide*, 2001.
- [19] E. Gobbo, S. Trachte, C. Massart, *Energy retrofit scenarios: material flows and circularity*, published in *IOP Conf, Series: Earth and Environmental Science* 225 (2019) 012029 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/225/1/012029, 2019.
- [20] D. Ergun, M. Gorgolewski, *Inventorying Toronto's single detached housing stocks to examine the availability of clay brick for urban mining*, published in *Waste management (New York, N.Y.)*. 45. 10.1016/j.wasman.2015.03.036, 2015.
- [21] A. Stephan and A. Athanassiadis, *With the right tools, we can mine cities*, published in [The Conversation](#), December 3th 2017.
- A. Bastin, *Vers une politique locale du métabolisme urbain ? Le cas des matériaux de (dé)construction à Plaine Commune*, published in *Urbanités, #12 / La ville (s)low tech*, 15 October 2019.

- A. Stephan, A. Athanassiadis, *Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks*, published in *Resources, Conservation and Recycling*. 129. 248–262. 10.1016/j.resconrec.2017.09.022, 2018.
- A-S. Nordby, B. Berge, F. Hakonsen, A. Hestnes, *Criteria for salvageability: The reuse of bricks*, published in *Building Research & Information*. 37. 55–67. 10.1080/09613210802476023, 2009.
- A. Tanguy (Université de Sherbrooke), *Le métabolisme urbain dans la transition écologique*, published in [Agence Science Press](#), 30 July 2019.
- Bureau for Standardisation (NBN, Belgium), standards EN15978 and EN15804 (<https://www.nbn.be/fr>)
- European Environmental Agency, *Urban sustainability issues - What is a resource-efficient city?*, [Technical Report No23/2015](#), December 10th 2015.
- Metabolism of cities online platform (<https://metabolismofcities.org/>)
- Minea website (<https://www.minea-network.eu/mission.php>)
- New Horizon website (<https://newhorizon.nl/>)
- P. Beurskens, E. Durmisevic, *Increasing reuse potential by taking a whole life-cycle perspective on the dimensional coordination of building products*, 2017.
- R. Androsevic, E. Durmisevic, M. Brocato, Maurizio, *Measuring reuse potential and waste creation of wooden façades*, published in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 225. 012017. 10.1088/1755-1315/225/1/012017, 2019.
- R. Androsevic, E. Durmisevic, M. Brocato, Maurizio, *Measuring reuse potential and waste creation of wooden façades*, published in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 225. 012017. 10.1088/1755-1315/225/1/012017, 2019.
- S. Erkman, G. Massard, S. Cariage, A. Bussard, *Les nouvelles ressources de Genève, 15 ans de travaux en écologie industrielle : résultats et perspectives*, Geneva, 2015.
- S. Huuhka, I. Vestergaard, *Building conservation and the circular economy: a theoretical consideration*, published in *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development*. ahead-of-print. 10.1108/JCHMSD-06-2019-0081, 2019.
- W. Galle, N. Temmerman, C. Cambier, S. Elsen, P. Herthogs, W. Lanckriet, J. Poppe, I. Tavernier, C. Vandervaeren, *Building a Circular Economy. Buildings, a Dynamic Environment*, 2019.

Source des illustrations : *Emilie Gobbo, 2021*, sauf indication contraire.

AUTRICE

Emilie Gobbo pour Bruxelles Environment (Belgique)

REMERCIEMENTS À

André Stephan de l'Université Catholique de Louvain (Belgique), Rafaela Tirado du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (France), Emmanuel Cortés Garcia, Susie Naval et Michaël Ghyoot de Rotor (Belgique), et Martial Vialleix de l'Institut Paris Région (France) pour leur relecture et leur contribution sur le fond

REMERCIEMENTS À

Michaël Ghyoot et Susie Naval de Rotor (Belgique) pour leur travail sur la version française



PARTENAIRES



CO-FINANCIERS

