



**HAL**  
open science

## Méthode de quantification des flux des mines urbaines : cas des briques en terre cuite en Ile de France

Sarah Clavier, Nada Bendahmane, Natacha Gondran, Jacques Chevalier

### ► To cite this version:

Sarah Clavier, Nada Bendahmane, Natacha Gondran, Jacques Chevalier. Méthode de quantification des flux des mines urbaines : cas des briques en terre cuite en Ile de France. 2023. emse-03792178v2

**HAL Id: emse-03792178**

**<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-03792178v2>**

Preprint submitted on 17 Jan 2023 (v2), last revised 24 Mar 2023 (v3)

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Méthode de quantification des flux des mines urbaines : cas des briques en terre cuite en Ile de France

### Method for quantifying urban mine flows: the case of clay bricks in Ile-de-France

Sarah Clavier<sup>b</sup>, Nada Bendahmane<sup>a,b</sup>, Natacha Gondran<sup>a\*</sup>, Jacques Chevalier<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Mines Saint-Etienne, Univ Lyon, CNRS, Univ Jean Monnet, Univ Lumière Lyon 2, Univ Lyon 3 Jean Moulin, ENS Lyon, ENTPE, ENSA Lyon, UMR 5600 EVS, Institut Henri Fayol, F - 42023 Saint-Etienne France

<sup>b</sup> Université Paris-Est, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 24 rue Joseph Fourier, Saint-Martin-d'Hères, 38400, France

\* Autrice correspondante : [Natacha.Gondran@emse.fr](mailto:Natacha.Gondran@emse.fr)

**Résumé :** Le secteur du bâtiment est un grand consommateur de ressources et un important producteur de déchets. Dans un contexte d'épuisement des ressources, on peut imaginer que le secteur du bâtiment devra mettre en place des stratégies pour devenir davantage circulaire. Une solution possible est d'avoir recours aux mines urbaines, c'est-à-dire, de voir les bâtiments existants comme un gisement de ressources disponibles pour les futures constructions ou rénovations du parc immobilier lors de leur déconstruction ou rénovation. Cet article propose une méthode pour mettre en relation des quantités de matériaux issus de la déconstruction et de la rénovation avec les besoins du secteur du bâtiment neuf ou de la rénovation. Après leur extraction des mines urbaines, les éléments de construction peuvent convenir à divers usages secondaires. Les usages possibles en sortie des filières de réemploi, réutilisation et de recyclage sont identifiés et les quantités de matériaux répondant à chacun de ceux-ci sont déterminés avec des unités adéquates (m<sup>2</sup>, kg...). Ces unités facilitent la comparaison entre les matériaux valorisés et la demande. La méthode se veut prospective en considérant comme hypothèse que l'économie circulaire est pleinement développée et que l'accent n'est mis que sur la faisabilité technique des modes de valorisation. Afin d'illustrer la méthode, le cas des briques en terre cuite en Ile-de-France est développé. Durant l'année 2020, 153 kt de briques en terre cuite proviennent de la démolition de bâtiment sur ce territoire, permettant d'obtenir au maximum (et sous réserve d'une bonne qualité de tri et des matériaux déconstruits), une surface de plus de 21 000 m<sup>2</sup> de parois en briques de maçonnerie, par exemple, et 9,2 kt de granulats destinés à la fabrication de béton.

**Mots-clés :** Mines urbaines ; Economie circulaire, Analyse de flux de matières ; bâtiment durable ;

**Abstract:** The building sector is a large consumer of resources and a major producer of waste. In a context of resource depletion, the building sector will have to implement strategies to become more circular. One possible solution is to resort to urban mining, i.e., to see existing buildings as a resource pool available for future construction or renovation of the building stock during their deconstruction or renovation. This article proposes a method to compare the quantities generated by deconstruction and renovation to the needs of new construction or renovation projects. After deconstruction, building components may be suitable for various secondary uses from reuse to recycling. The uses issued from reuse and recycling are identified and the quantities of materials corresponding to each of them are determined with adequate units (m<sup>2</sup>, kg...) to be compared with the new buildings' project's needs. These units facilitate the comparison between the recovered materials and the demand of components and materials. The method assumes that circular economy is fully developed and that the focus is only on the technical feasibility of recovery methods, ignoring the socio-economic obstacles to reuse and recycling. To illustrate the method, the case of clay bricks in Ile-de-France is detailed. During the year 2020, 153 kt of clay bricks come from the demolition of buildings in this territory, allowing to obtain, for example, a maximum surface of more than 21,000 m<sup>2</sup> of masonry bricks, in reuse, and 9.2 kt of aggregates for concrete manufacturing.

**Key words:** Urban mining; Circular Economy; Material flow analysis; sustainable Building;

## 1 INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment génère beaucoup de déchets, consomme de grandes quantités de ressources et engendre des impacts environnementaux négatifs considérables (Ajayebi *et al.*, 2020). En France, en 2018, les déchets du bâtiment sont estimés à environ 46 millions de tonnes, soit 13% des déchets du pays (SDES, 2021), dont la majorité (87%) est générée lors des étapes de démolition et de rénovation (MTE, 2020a). Depuis 1990, 50% de la consommation intérieure apparente de matières en France concerne les matériaux de construction (Institut Paris Région, 2021). La part de la consommation au niveau mondial est également importante, avec environ 65% du total des granulats et 20% du total des métaux utilisés pour la construction de bâtiments (Krausmann *et al.*, 2017). Au niveau national, la pression sur certaines ressources se fait déjà sentir dans certains territoires. En Île-de-France, 50% des granulats sont importés d'autres régions car le territoire ne peut pas répondre entièrement à la demande (Institut Paris Région, 2021). Au niveau mondial,

avec l'urbanisation et la croissance démographique, la consommation de matériaux devrait encore augmenter (Stephan et Athanassiadis, 2018). Aujourd'hui une grande partie des déchets minéraux issus du secteur de la construction est recyclée en remblaiement (Krausmann et al., 2017), ce qui constitue du « décyclage », c'est-à-dire à une utilisation pour un usage qui nécessite une qualité de matériau moins noble que celle de l'application initiale du matériau (Di Maria *et al.*, 2018), i.e. à une diminution de la quantité de matériaux disponibles pour des usages plus nobles. Se tourner vers une valorisation de plus haute qualité permettant de boucler le cycle des matériaux et de réduire la consommation de ressources primaires pour la construction semble donc nécessaire pour optimiser l'usage des matériaux valorisés et réduire l'extraction de nouvelles ressources (Yang *et al.*, 2022).

L'une des façons d'y parvenir est de considérer le stock de bâtiments en cours d'utilisation comme un gisement de ressources pouvant, à l'avenir, être réutilisé : le parc immobilier est ainsi vu comme une mine urbaine. Cette approche est basée sur l'économie circulaire et la législation française tend de plus en plus à favoriser ce modèle. D'après le gouvernement français, « *L'économie circulaire consiste à produire des biens et des services de manière durable en limitant la consommation et le gaspillage des ressources et la production des déchets. Elle vise à passer d'une société du tout jetable, basé sur une économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer, jeter) vers un modèle économique plus circulaire* » (MTE, 2020b). En effet, la loi de transition énergétique pour la croissance verte, publiée le 18 Août 2015, avait fixé l'objectif de valoriser 70 % des déchets du BTP d'ici 2020 (ADEME, 2020) et dans le cadre de la loi Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire, dite loi AGEC, une filière de Responsabilité Elargie des Producteurs (REP) a été mise en place pour les produits et équipements du bâtiment, ce qui devrait augmenter les taux de collecte des produits concernés (ADEME, 2020). Cette loi a également rendu obligatoire la réalisation d'un diagnostic déchets, lors de la déconstruction de bâtiments ayant une surface de plancher supérieure à 1 000 m<sup>2</sup> ou ayant contenu une ou plusieurs substances dangereuses, qui permet d'évaluer les possibilités de réemploi des produits présents dans les bâtiments et, à défaut, d'une autre valorisation. Cette initiative découle de la directive européenne 2008/98/CE relative aux déchets, qui hiérarchise les modes de traitement, de la prévention à l'élimination. Depuis 2011, ce diagnostic a évolué en intégrant des catégories de déchets et produits plus détaillées et en faisant une distinction entre, d'une part, les produits avec un potentiel de réemploi, et, d'autre part, les déchets.

Les termes concernant l'économie circulaire n'ont pas toujours les mêmes définitions selon les sources d'information. Par exemple, en anglais, il n'y a pas de distinction entre la réutilisation et le réemploi. Il semble donc opportun de préciser les définitions des différents termes qui seront utilisés dans cet article. Celles-ci s'appuient principalement sur l'article L541-1-1 du code de l'environnement, qui définit les filières de valorisation des matériaux. Nous entendons ici le *réemploi* comme le processus par lequel les éléments de construction issus de la déconstruction (minutieuse) d'un bâtiment sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus. La *réutilisation* se distingue par le fait que les éléments sont utilisés de nouveau mais pour d'autres usages. Ces deux procédés englobent toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation. Dans la suite de cet article, seul le terme réemploi sera utilisé pour évoquer ces deux modes de valorisation. Le recyclage concerne quant à lui toute opération de valorisation par laquelle les déchets sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Par ailleurs, l'expression « déconstruction » sera privilégiée par la suite. Lors de la rénovation ou de la démolition des bâtiments, des opérations de dépose minutieuses et contrôlées permettent de produire des composants et matériaux à réemployer. Même si, aujourd'hui, il n'y a souvent qu'une partie de déconstruction avant rénovation ou démolition nous utiliserons ce terme en considérant que toute démolition est une déconstruction dans le sens où chaque élément d'un bâtiment est déposé soigneusement.

Afin d'évaluer dans quelle mesure les matériaux sortant du parc immobilier peuvent être réintégrés dans de nouvelles constructions, il est crucial de connaître ce parc en termes de quantité et d'origine des matériaux (secteurs d'activité, zone géographique, ...). En effet, cela permet de savoir où, quand et en quelle quantité et qualité les différents matériaux seront disponibles. L'analyse des flux de matières (AFM) permet de répondre à cet objectif. Les études s'intéressant aux mines urbaines du secteur de la construction ont presque toutes utilisé cet outil (Krausmann *et al.*, 2017; Stephan et Athanassiadis, 2018; Ajayebi *et al.*, 2020; Arora *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2022) à l'exception de celles qui ont expérimenté la théorie des mines urbaines sur le terrain (Arora *et al.*, 2020, 2021). Pour Ajayebi *et al.* (2020), Koutamanis *et al.* (2018) et Stephan & Athanassiadis, (2018), la quantification des flux entrants et sortants annuels, donnée par les modèles d'AFM, permet d'éclairer la prise de décision pour rendre le secteur de la construction plus circulaire.

Néanmoins, bien que ces modèles permettent aux décideurs d'identifier les principaux flux de matériaux et d'anticiper les périodes de déconstruction ou de rénovation intenses, Yang *et al.* 2022 suggèrent

que pour savoir si la demande de matériaux peut être satisfaite, il est nécessaire d'aller au-delà d'une comparaison directe des flux d'entrée et de sortie. En effet, on ne peut se contenter de comparer directement les quantités de produits déconstruits avec la demande de produits de construction car pour espérer qu'un produit soit réintégré dans une nouvelle construction ou une rénovation, il doit être valorisé pour répondre à des fonctions précises en fonction de son état et de sa qualité. Cette précédente étude a donc intégré le recyclage au modèle habituel, tout comme l'ont fait Krausmann et al. (2017) et Stephan & Athanassiadis (2018). Le fait d'ajouter une filière de valorisation entre l'étape de déconstruction et celle de construction permet de ne pas comptabiliser les produits qui ne remplissent pas les exigences des filières, diminuant ainsi les quantités disponibles, car dans la pratique, tous les composants d'un bâtiment ne sont pas recyclables. Cependant, si l'étude des mines urbaines s'est largement concentrée sur le recyclage, notamment du béton et des métaux (Arora *et al.*, 2021), le réemploi est un autre mode de valorisation à prendre en compte. C'est d'ailleurs ce à quoi se sont appliqués Ajayebi et al. (2020) et Arora et al. (2020, 2021), toutefois, aucune de ces études n'a combiné plusieurs filières de valorisation dans son modèle.

D'autre part, la typologie du parc immobilier rend difficile la mise en relation des ressources sortant du parc avec les flux de matériaux mobilisés pour la rénovation et/ou la nouvelle construction. Comme le soulignent Ajayebi et al. (2020) et Arora et al. (2020), la plupart des études d'évaluation du parc immobilier se concentrent sur l'estimation des quantités de matériaux, plutôt que celles des produits, et cela sous une forme agrégée. Un bâtiment est composé de divers composants et sa démolition engendre bien des composants, mais ceux-ci sont potentiellement mélangés, brisés, dès lors, la démolition n'engendre pas des ressources matérielles directement utilisables. Les ressources sont vues ici comme des matériaux bruts auxquels aucune fonction n'a encore été attribuée, alors qu'un composant est un assemblage de ressources dont le tout a une fonctionnalité. Dans une optique de réemploi, Arora et al. (2020) recommandent donc d'opter pour une typologie en composants. D'un autre côté, Ajayebi et al. (2020) étudient le réemploi des briques et suppose de complètement désagréger les flux de sorties par type de matériaux, date de fabrication, taille, afin de quantifier correctement le taux de réemploi. De plus, le fait que les matériaux déconstruits soient inventoriés en masse rend difficile la correspondance entre l'offre (les matériaux déconstruits) et la demande (les besoins du projet de construction ou rénovation) qui s'exprime plutôt dans toutes sortes d'unités (nombres de fenêtres, m<sup>2</sup> de tuiles, ...).

L'estimation en termes de composants plutôt que de ressources matérielles implique donc de s'intéresser aux usages que peuvent avoir les composants déconstruits après leur valorisation. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'on s'intéresse à la réutilisation qui récupère des produits en les détournant de leur usage initial, il faut préciser cet usage secondaire. De même, les matériaux recyclés, ayant des niveaux de qualité différents que les ressources vierges, peuvent ne pas convenir à toutes les utilisations, il est donc nécessaire de préciser leur qualité et donc à quels usages ils peuvent répondre. Toutefois, le décyclage a été évoqué précédemment et met le doigt sur le fait que tous les usages secondaires ne se valent pas et qu'à l'inverse, des matériaux recyclés peuvent avoir une qualité intrinsèque supérieure à celle requise à l'usage qui en est fait.

Néanmoins, le réemploi n'est pas encore une pratique systématique et pour de nombreux matériaux, le décyclage est privilégié (Arora *et al.*, 2020), notamment du fait du soin qu'il faut apporter aux chantiers de déconstruction pour permettre le réemploi, ainsi qu'aux contraintes liées au stockage et aux transports des produits déconstruits (Lachat *et al.*, 2021). De plus, plusieurs recherches (Krausmann *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2022) ont démontré que la demande de matériaux pour les nouvelles constructions et la rénovation dépasse l'offre de matériaux secondaires issus du recyclage. L'augmentation de l'urbanisation entraîne une plus grande demande de matériaux pour la construction de nouveaux bâtiments. Dans les années à venir, le développement des pays va donc entraîner une forte utilisation de ressources. Un état des lieux des pratiques actuelles serait nécessaire pour estimer la part d'approvisionnement que les stocks actuels de bâtiments pourraient représenter par rapport à la demande de construction/rénovation. Néanmoins, il est également intéressant d'estimer dans quelle mesure, d'un point de vue quantitatif, le recyclage et le réemploi peuvent permettre de répondre à la demande de construction.

Le présent article propose de s'intéresser aux composants issus de la déconstruction ou de la rénovation d'un stock de bâtiments donnés et de proposer une méthode mobilisable pour les différentes filières de valorisation matière (réemploi et recyclage). L'objectif de cet article est de proposer une méthode visant à quantifier, à partir des flux sortants produits par la déconstruction et la rénovation du parc immobilier, les masses respectives de composants déconstruits pouvant être utilisées par les filières de réemploi et de recyclage. Il s'agit donc de modéliser les flux depuis la déconstruction jusqu'à l'utilisation des matériaux pour des usages secondaires. Ces derniers, identifiés en sortie des trois modes de valorisation, seront caractérisés

par leur qualité et quantifiés en termes de composants, pour le réemploi, et en ressources, pour le recyclage, tous susceptibles d'être utilisés directement comme intrants d'un nouveau bâtiment. En effet, afin de prendre en compte la valorisation des produits de déconstruction en réemploi, les usages qui peuvent être faits des matériaux récupérés à l'étape précédente devront être identifiés et quantifiés dans leur unité fonctionnelle. Une vision prospective est adoptée afin de faire ces quantifications en ne prenant en compte que la faisabilité technique et fonctionnelle, pour évaluer le devenir des flux sortants. Les auteurs de l'article sont conscients que les limites au réemploi et au recyclage ne sont pas seulement techniques mais aussi organisationnelles, économiques, assurantielles et réglementaires (voir par exemple (Bauby et al., 2022) pour une description de certaines de ces limites), mais il s'agit ici d'estimer une quantité maximale de ressources et équipements pouvant être remis en œuvre à partir des mines urbaines.

## **2 MATERIELS ET METHODES**

Cette section détaille les différentes étapes permettant d'atteindre cet objectif en fonction des déconstructions du parc immobilier. Pour chaque composant déconstruit, il s'agit d'estimer la part pouvant être réemployée et recyclée, puis d'identifier et de quantifier les usages secondaires qui peuvent être produits grâce à ces modes de valorisation. Ces estimations sont réalisées dans le cadre de certaines hypothèses que nous détaillons plus loin. En outre, chaque usage devra être exprimé dans l'unité fonctionnelle appropriée et une échelle comparative de la qualité des usages secondaires sera présentée.

### **2.1 Hypothèses de travail**

Afin d'estimer la quantité maximale de ressources, de produits et équipements pouvant être extraits de la déconstruction des bâtiments, les quantifications de cette étude sont réalisées dans le cadre d'un scénario où le modèle d'économie circulaire serait pleinement développé et optimisé dans la construction. Les parties prenantes des chantiers sont considérées comme convaincues par le modèle, même si ce n'est pas forcément le cas aujourd'hui. De nombreuses études relèvent l'absence apparente de marché de récupération et de demande de composants ou matériaux de construction issus des mines urbaines pour diverses raisons, notamment l'acceptation des consommateurs et les pratiques de construction (Arora *et al.*, 2021). Nous posons dans ce travail de quantification l'hypothèse que, s'il est nécessaire de détruire un bâtiment, les acteurs ne pratiquent que la déconstruction sélective et qu'ils ont toujours en vue de réemployer d'abord les produits



extraits des chantiers de déconstruction (au sens du réemploi tel que défini plus tôt dans cet article), puis de recycler et enfin de diriger les composants déconstruits vers des filières d'élimination ; et tout cela avec les technologies actuelles de récupération et de valorisation. Notons que cette hypothèse de hiérarchie entre les types de valorisation repose sur les préconisations de la directive européenne 2008/98/CE : le réemploi prévaut, le recyclage doit être envisagé ensuite, puis la valorisation énergétique et enfin l'élimination. L'aspect prospectif de ce scénario porte sur cette volonté de respecter cette hiérarchie. Les deux derniers modes de gestion sans valorisation matière ne sont pas traités en détail et sont regroupés en un seul : "fin de vie".

Néanmoins, le mélange des produits ou matériaux constitue l'un des obstacles techniques à la valorisation. Il est donc considéré que tous les composants déconstruits sont triés et que ce tri est très strict. Cela signifie que chaque type de produit est séparé des autres afin de favoriser le réemploi et de permettre le recyclage des matériaux non mélangés, évitant ainsi leur pollution par d'autres éléments (déchets inertes pollués par les déchets non dangereux non inertes). Dans la pratique, les surfaces de stockage des produits déconstruits ne sont souvent pas assez importantes en vue de leur réemploi (CSTC, 2019). Une autre hypothèse est donc que les surfaces de stockage sont toujours considérées comme suffisantes par rapport aux quantités de matériaux présentes dans les bâtiments même si cela peut être très problématique en milieu urbain.

Les problèmes de stockage peuvent également entraîner une incompatibilité temporelle, pour le réemploi, qui peut se produire lorsque l'offre (au moment du chantier de déconstruction) et la demande (le chantier de construction) ne sont pas coordonnées (Arora *et al.*, 2021). Dans le cadre de ce travail, ce critère temporel n'est pas pris en compte en supposant que tout producteur de matières premières/produits secondaires arrive à se coordonner avec un acheteur pour valoriser les produits de la déconstruction. Un autre obstacle au réemploi, également négligé dans ce modèle, est que la construction doit souvent être adaptée aux matériaux réutilisés plutôt que l'inverse. Par exemple, si une nouvelle structure espère utiliser des fenêtres réemployées, elle devra adapter la taille de l'ouverture du mur à celle du châssis.

Il ne s'agit donc pas d'une vision d'un futur où de nouvelles technologies de valorisation auraient été développées mais d'un scénario qui privilégierait l'économie circulaire pour les ressources avec les technologies existantes. Le seul point d'attention des quantifications étant la faisabilité technique des méthodes de gestion des éléments déconstruits et de leur seconde vie.

Dans un souci d'optimisation des ressources valorisées, il est considéré que, dans la mesure du possible, les usages requérant une qualité fonctionnelle supérieure sont priorisés, évitant ainsi le décyclage. De plus, on favorise une circulation en interne i.e. en priorisant les usages disponibles pour le secteur du bâtiment.

Afin de valider ces hypothèses, nous avons étudiés des scénarios déjà existants. Par exemple, l'ADEME (2021) a proposé des scénarios plus complets, incluant des changements sociétaux et une perspective 2050. Dans les 4 scénarios, le réemploi est développé pour les produits et matériaux de construction. De nombreuses hypothèses du scénario " génération frugale " rejoignent celles formulées dans cette étude. En effet, le tri et la collecte sélective y sont massifiés et peu d'évolutions technologiques sont considérées entre 2015 et 2050.

## **2.2 Déroulé de la méthode et données estimées**

Les prochains paragraphes expliciteront les données utilisées afin de modéliser les flux de matériaux depuis la déconstruction jusqu'à leur réintroduction dans des rénovations ou constructions. La figure 1 présente un schéma simplifié de ces données.

### **2.2.1 Détermination des flux de déconstruction**

En premier lieu, nous chercherons à déterminer les flux issus de la déconstruction. Chaque territoire et chaque période de construction peut avoir ses propres spécificités en termes d'architecture et donc de répartition des matériaux et composants. De plus, le type des bâtiments déconstruits ou rénovés peut évoluer dans le temps du fait de l'arrivée en fin de vie d'un certain type de bâtiments construits dans une période donnée (en 2050, les bâtiments construits en 2021 seront probablement déconstruits alors qu'en 2022 presque aucun ne le sera). Toutes les données à estimer doivent donc l'être dans un cadre spatio-temporel  $(x; n)$  bien précis (Tirado *et al.*, 2021).

Afin d'estimer les quantités de déchets de déconstruction, cette étude s'appuie sur les données d'évaluation des stocks de flux de matériaux (i.e. des quantités de divers matériaux) développées par le CSTB avec le modèle d'AMF nommé BTPflux (Tirado *et al.*, 2021). Ce modèle utilise une approche ascendante en macro-composants qui permet d'étudier, pour une année choisie  $n$ , les flux de déchets de démolition et de rénovation à plusieurs échelles géographiques  $x$  (région, département...) pour plusieurs types de bâtiments (résidentiels, bureaux...) et familles de déchets comme le montre le tableau 1 (Tirado *et al.*, 2021). La

composition du parc immobilier est d'abord estimée avec l'exploitation de données foncières, d'outils du système d'information géographique (SIG) et de diagnostics de performance énergétique. Ensuite les flux de déconstruction sont estimés avec des taux de démolition et de rénovation appliqués aux différents types de bâtiments et de composants.

Tableau 1: Exemple de famille de déchet et leur classification prise en compte par BTPflux (En gras les déchets minéraux)

<b>Famille de déchet</b>	<b>Type de déchet</b>
<b>Briques en terre cuite</b>	Déchet inerte (DI)
<b>Tuiles en terre cuite</b>	Déchet inerte (DI)
<b>Céramiques</b>	Déchet inerte (DI)
<b>Béton et roches</b> (ardoise, pierre naturelle, gravier)	Déchet inerte (DI)
<b>Plaque et planches de plâtre</b>	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
<b>Isolant en laine minérales</b>	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Autres isolants	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Métaux ferreux	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Métaux non ferreux	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
<b>Fenêtres</b>	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Bois faiblement adjuvanté	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)
Autres DNDNI	Déchet non dangereux non inerte (DNDNI)

La méthode a été expérimentée sur les composants générant les déchets à forte composition minérale présents dans le tableau 1.

Le modèle BTPflux n'estime cependant pas des quantités de composants déconstruits dans leur unité fonctionnelle (m<sup>2</sup>, unités...) mais les masses de déchets. Néanmoins, ces masses sont déterminées pour certains composants des familles de déchets du tableau 1. Par exemple, il est possible d'avoir accès aux masses de fenêtres en bois simple vitrage déconstruites, ou d'isolants en laine de verre. Nous avons discuté plus tôt l'intérêt d'exprimer les flux en termes de composants pour le réemploi, une conversion sera donc effectuée par la suite.

### **2.2.2 Détermination des échelles d'opérations des modes de valorisation**

Les échelles géographiques d'opération des filières de réemploi et de recyclage peuvent être définies en termes de distance autour d'un chantier. En effet, un chantier de construction neuve ou de rénovation doit évaluer l'offre disponible en matériaux valorisés afin de répondre à ses besoins. Cette évaluation s'inscrit dans un cadre géographique défini car un chantier parisien ne se fournira généralement pas en produits de

construction provenant de Marseille par exemple. Il faut ainsi déterminer une zone autour du futur chantier dans laquelle des chantiers de déconstruction sont de potentiels fournisseurs de matériaux secondaires. Ces zones permettront de déterminer l'échelle géographique, disponible sur BTPflux, la plus adaptée, et cela pour chaque composant.

### 2.2.3 Détermination du taux de réemploi

Dans la pratique, les étapes de dépose et du transport des composants d'un bâtiment peut engendrer des dommages à ces derniers, ce qui réduit les quantités des flux en sorties qui pourraient être réemployés. De plus, certains composants, ayant été en contact avec de l'humidité, des polluants ou ayant perdu leur fonctionnalité ou leur aspect par exemple, ne peuvent être réemployés. Par conséquent, il faut tenir compte du rendement du réemploi qui diffère entre chaque composant. La quantité de produit  $i$ , en kg, réellement réemployée,  $Réemploi_{Composant\ i}$  est ensuite estimée selon l'équation [1] ci-dessous :

$$Réemploi_{Composant\ i} = M_{Composant\ i} \times \tau_{réemploi\ composant\ i} \quad \# [1]$$

Équation 1 : Estimation de la quantité de chaque composant réemployé.

Où  $M_{Composant\ i}$  est la masse totale de composant déconstruit en kg et où le taux de réemploi  $\tau_{réemploi\ composant\ i}$  définit le pourcentage de masses du produit  $i$  qui peut être réemployé. Ainsi,  $1 - \tau_{réemploi\ composant\ i}$  est le taux de perte associé aux dommages fonctionnels, physiques et de traitement évoqué précédemment qui diminuent la possibilité de réemploi d'un produit ou d'un matériau. Ce taux peut être considérablement élevé du fait que la plupart des bâtiments n'ont pas été conçus de manière à favoriser le réemploi et le recyclage des matériaux (Arora *et al.*, 2020). Notons que la facilité de récupération d'un même élément de construction peut varier d'un chantier à l'autre ainsi qu'à l'intérieur d'un même bâtiment selon les modalités de mise en œuvre du composant. C'est pourquoi un taux de réemploi englobant toutes les problématiques liées au réemploi est utilisé. Pour le déterminer, toutes les conditions que doit vérifier un produit pour être réemployé doivent être identifiées et quantifiées.

Si on prend l'exemple des isolants en laine minérale, on ne peut réemployer que les isolants ayant été fabriqués après l'année 2000 pour des questions de conformité aux exigences des réglementations thermiques du bâtiment et de santé. De plus, pour des raisons de facilité de démontage, les isolants avec des fixations mécaniques (vis, chevilles...) se prêtent davantage au réemploi que ceux collés, le reste des isolants (fabriqués avant 2000 et/ou avec un autre mode de fixation) ne sont pas considérés comme des flux potentiellement

réemployables. Le taux de réemploi prend donc en compte ces caractéristiques. La figure 1 présente schématiquement ce mode de réflexion.

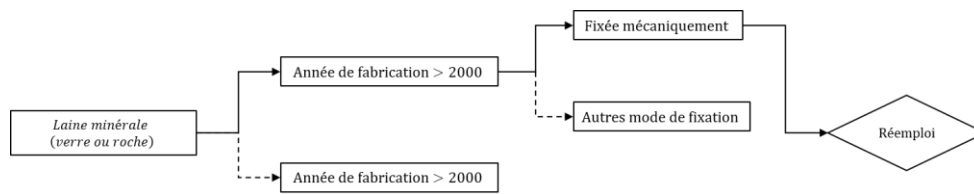


Figure 1: Exemple des flux déterminants le taux de réemploi (en pointillé les flux non comptabilisés)

#### 2.2.4 Détermination du taux de recyclage

Les composants qui ne peuvent pas être réemployés peuvent parfois être recyclés. L'une des hypothèses de cette étude étant que la hiérarchie du traitement des déchets est toujours respectée, il est possible de calculer la masse du produit recyclé  $i$ ,  $Recyclage_{Composant\ i}$  en kg, à partir des éléments identifiés ci-dessus (équation [2]).

$$Recyclage_{Composant\ i} = (M_{Composant\ i} - Réemploi_{Composant\ i}) \times \tau_{recyclage\ composant\ i} \quad \#[2]$$

Équation 2 : Estimation de la quantité de chaque composant recyclé

Comme précédemment, un taux de recyclage,  $\tau_{recyclage\ composant\ i}$  en %, est appliqué à la masse de composant restante en kg ; soit la masse totale du composant  $i$ ,  $M_{Composant\ i}$ , à laquelle on retire celle qui est réemployée  $Réemploi_{Composant\ i}$ , toutes deux exprimées en kg. Le taux de perte  $1 - \tau_{recyclage\ composant\ i}$  peut prendre en compte l'efficacité des procédés de recyclage, la pollution des produits ou d'autres problématiques qui réduisent les possibilités de recyclage.

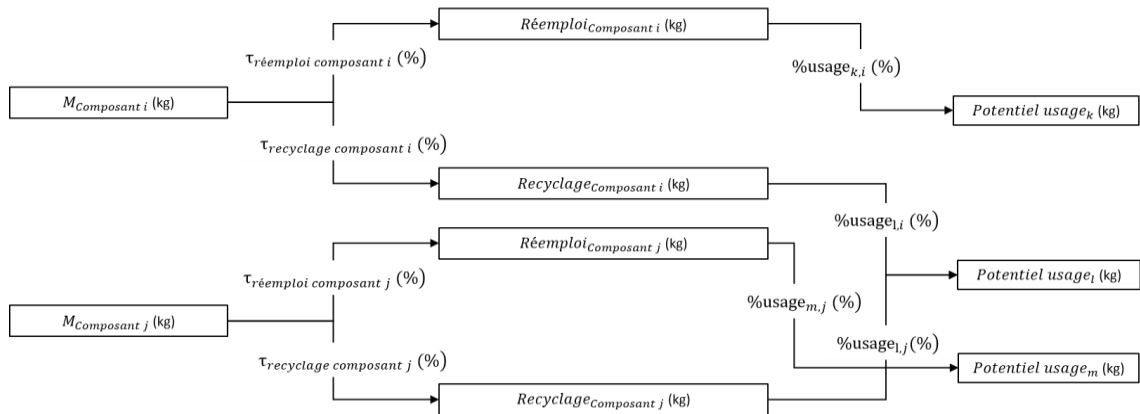
#### 2.2.5 Détermination des usages secondaires disponibles

Au final, les matériaux et composants déconstruits non réemployés pourront potentiellement faire l'objet de plusieurs usages secondaires, sous forme de valorisation matière dans le secteur du bâtiment. Il s'agit maintenant de les quantifier. Le potentiel de l'usage  $k$  (en kg) est déterminé à partir de l'équation [3]. Le terme potentiel est utilisé car, en théorie, il est possible d'attribuer la totalité du stock d'un usage/produit valorisé au secteur du bâtiment. En pratique, les usages secondaires sont souvent partagés avec d'autres secteurs comme les travaux publics (exemple : la fabrication de béton à partir de granulats recyclés sert pour le secteur du BTP).

$$Potentiel\ usage_k = \sum_i \begin{cases} Réemploi_{composant\ i} \times \%usage_{k,i} & \text{si le réemploi du composant } i \text{ permet l'usage } k \\ Recyclage_{composant\ i} \times \%usage_{k,i} & \text{si le recyclage du composant } i \text{ permet l'usage } k \\ 0 & \text{si le composant } i \text{ ne peut permettre l'usage } k \end{cases} \quad \#[3]$$

Équation 3: Estimation de la quantité de chaque composant pouvant faire l'objet d'un usage secondaire

Le terme  $\%usage_{k,i}$  correspond à la part de l'usage secondaire k après une des filières de valorisation (réemploi ou recyclage) du composant i. Comme le montre la figure 2, plusieurs composants peuvent être à l'origine du même usage secondaire. Par exemple, des éléments en béton et les briques en terre cuite peuvent



être concassées pour produire du béton.

Figure 3: Schéma simplifié des données à quantifier et l'unité dans laquelle elles sont exprimées

### 2.2.6 Conversion en unités fonctionnelles pour répondre aux besoins de réemploi

Comme évoqué précédemment, pour le réemploi, il est nécessaire d'exprimer les produits secondaires dans leur unité fonctionnelle (U) plutôt qu'en masse. L'étape suivante (équation [4]) consiste à convertir les masses dans la bonne unité à l'aide de poids unitaires. Rappelons que cette étape n'est pas nécessaire pour le recyclage car ce procédé produit des ressources, le kg est donc une unité adaptée.

$$Potentiel\ usage_k [U] = \frac{Potentiel\ usage_k [kg]}{Poids\ unitaire \left[ \frac{kg}{U} \right]} \quad \#[4]$$

Équation 4: Facteur de conversion en unité fonctionnelle

## 2.3 Sources de données

### 2.3.1 Recherche bibliographique

L'évaluation des données est faite en partie par une recherche bibliographique afin d'estimer les taux de valorisation théoriques, les points d'attention techniques empêchant le réemploi ou le recyclage, les usages secondaires retrouvés à l'issus des diverses filières ainsi que les périmètres d'intervention de ces dernières.

La volonté de quantifier les différents ratios présentés ci-dessus pour des pratiques de valorisation ou d'usages secondaires, qui sont parfois émergents, nous a conduits à proposer une table de correspondance entre les vocables pouvant décrire l'intensité d'une pratique à des valeurs de taux (tableau 3).

Tableau 2: Grille de conversion mots-taux

Taux	Mots retrouvés dans la littérature
0 à 1%	Presque jamais, quasiment nul, impossible
1 à 20%	Parfois, peu, rarement, difficilement
21 à 50%	Souvent, couramment, facilement
51 à 80%	Principalement, majoritairement, généralement, la plupart du temps, très facilement
81 à 100%	Presque toujours

### 2.3.2 Enquêtes auprès d'acteurs de valorisation

Dans un deuxième temps, des enquêtes auprès d'acteurs des filières liées aux matériaux du tableau 1 permettent d'obtenir l'avis d'experts sur les données trouvées lors de la recherche bibliographique. Un questionnaire leur a été adressé lors d'entretiens semi-directifs à propos de l'activité de leur structure (intervention dans la chaîne de valeur, matériaux reçus...), les taux de valorisation et ce qui advient des invendus, les obstacles que leur filière peut rencontrer. Dans le but de compléter les informations trouvées lors de la phase d'étude de la littérature, les entretiens étaient clôturés avec des questions spécifiques aux produits cités dans le tableau 1. Le tableau 2 présente les acteurs contactés.

Tableau 3: Typologie des acteurs de réemploi contacté (AMO : Assistant maître d'ouvrage ; BET :Bureau d'étude technique)

Acteur	Typologie d'activité	Région
ECOMAT38	Déconstruction, Plateforme de reconditionnement	Auvergne Rhône Alpes
Cycle Up	AMO réemploi, Marketplace	Ile-de-France
Backacia	AMO réemploi, Marketplace	Ile-de-France
Elan (Bouygues)	AMO réemploi, Plateforme de reconditionnement, Entreprise de travaux	Ile-de-France
La ressourcerie du BTP	Plateforme de reconditionnement, Entreprise de travaux	Ile-de-France
Tricycle	Plateforme de reconditionnement, AMO réemploi	Ile-de-France
Remix	AMO réemploi, BET spécialisé	Ile-de-France

## 3 APPLICATION DE LA METHODE A LA FILIERE DES BRIQUES EN TERRE CUITE ET DISCUSSION

Afin de valider la méthode proposée, cet article en propose une application au cas des briques en terre cuite que l'on peut retrouver à l'issue des chantiers de démolition et de rénovation en Ile de France réalisés en 2020.

### 3.1 Application de la méthode à la filière des briques en terre cuite

Bien que chacun des produits des familles de déchets du tableau 1 ait été étudié, la section suivante présente uniquement l'application de la méthode et les résultats pour les briques en terre cuite issues des bâtiments démolis et rénovés en 2020 en Île-de-France. Trois types de briques sont comptabilisés par le modèle de BTPflux : les briques pleines, les briques creuses - toutes deux utilisées pour les murs de structure - et les briques creuses présentes dans les cloisons, appelées briques plâtrières parce qu'elles sont hourdées au plâtre. Le modèle d'analyse de flux de matière a permis d'estimer les masses sortant du parc immobilier de ces trois types de composants :

$$M_{\text{Briques pleines}} = 75 \text{ kt} ; M_{\text{Briques creuses}} = 52 \text{ kt} ; M_{\text{Briques plâtrières}} = 26 \text{ kt}.$$

Dans un premier temps, nous avons estimé les différents taux de réemploi, pour chaque type de briques à partir des retours d'expérience et de l'analyse de la littérature. Seules les briques pleines n'ayant pas été en contact avec de l'eau ou des polluants de manière persistante peuvent être réemployées car elles n'ont pas subi de dommages qui pourraient compromettre leur remise en œuvre (FCRBE, 2021). Ensuite, les briques pleines sont plus ou moins réemployées selon le mortier avec lequel elles sont assemblées (FCRBE, 2021). Un mortier tendre à base de chaux rend la dépose relativement aisée, alors qu'un mortier-colle ou un ciment complique largement cette dernière (FCRBE, 2021). On considère néanmoins une dépose efficace avec la seconde méthode car, d'après Zhou et al. (2020), il est tout de même possible de déposer correctement ces briques. Enfin, un tri est effectué et 50 à 70% des briques pleines peuvent être réemployées. Ainsi, en combinant tous les paramètres (types de mortier, rendement de la dépose et du tri)  $\tau_{\text{réemploi brique pleine}}$  a été estimé entre 31 et 67,5%. Les approximations

Les briques creuses et les briques de plâtre sont de mauvaises candidates pour le réemploi avec un taux de réemploi inférieur à 1% en raison de leur grande fragilité ( $\tau_{\text{réemploi brique creuse}}, \tau_{\text{réemploi brique plâtrières}}$  estimés entre 0 et 1%). Néanmoins, elles peuvent être recyclées après avoir été séparées du plâtre ou de l'enduit les recouvrant. En France, une seule filière procède à cette



séparation et elle se trouve en Auvergne-Rhône Alpes (Démoclès, sans date; SEDDRé et ADEME, 2020). Ce procédé étant techniquement réalisable, il est donc considéré que toutes les briques franciliennes peuvent en bénéficier. Lors de la visite sur le site séparant les briques et le plâtre, il nous a été indiqué que les briques plâtrières arrivant sur le site étaient recyclées à 100% (le remblaiement étant comptabilisé ici). En supposant que certaines briques, polluées par exemple, ne peuvent pas être intégrées dans une filière de recyclage, on préférera prendre un taux de recyclage plus faible en accord avec notre grille de correspondance (tableau 3), soit des  $\tau_{\text{recyclage brique creuse}}$  et  $\tau_{\text{recyclage brique plâtrières}}$  entre 81 et 100%.

La littérature et les entretiens avec les acteurs des filières possibles pour les briques issues de la démolition ou déconstruction ont permis d'identifier les différents usages des briques valorisées. Il peut s'agir aussi bien de composants destinés au secteur du bâtiment (brique pour maçonnerie porteuse, granulats pour la fabrication de béton, etc.) que de produits valorisés en boucle ouverte, i.e. destinés à un autre secteur (aménagement paysager, terrains de tennis, etc.). Notons cependant que les différents usages potentiels dépendent du niveau de qualité intrinsèque des matériaux récupérés. Ainsi, nous supposons qu'une brique pleine initialement utilisée en maçonnerie porteuse peut potentiellement convenir à tout usage secondaire, alors qu'une brique initialement utilisée en parement ne pourra pas convenir à un usage structurel. En matière de recyclage, deux " familles " peuvent être identifiées : les matériaux qui peuvent être utilisés pour reconstituer des produits (béton, éléments de silicate de calcium, etc.) et ceux qui sont utilisés tels quels pour une certaine fonction (technique routière, amendement, etc.). Les éléments en terre cuite peuvent être recyclés pour produire d'autres composants, ce qui permet de valoriser des produits ayant une qualité inférieure à ceux réemployables car le produit est physiquement détruit par le procédé de recyclage, mais cette opération consomme beaucoup d'énergie.

Suite à l'analyse de la littérature et aux entretiens menés auprès des acteurs de réemploi, nous avons estimé que 5% des briques pleines ont été réemployées en maçonnerie et 32% en parement. Concernant les briques creuses, elles sont principalement recyclées, même si une petite part est réemployée en aménagement paysager.

D'après la plupart des acteurs que nous avons rencontrés, le réemploi opère généralement au niveau de chaque département, le plus souvent dans un rayon de 50 km maximum. Cependant, les éléments rares ou en grande quantité peuvent justifier un transport plus lointain. De plus, les briques sont des produits

relativement lourds, il se peut donc que le réemploi opère encore plus localement. D'après (Bazzana, Monfort et Rodrigues, 2018; SEDDRé et Crowe Sustainable Metrics, 2018), le recyclage est réalisé dans un rayon de 30 km pour les déchets inertes.

Enfin, d'après la base de données des produits et équipements du bâtiment INIES, les briques de maçonnerie et de parement font en moyenne respectivement 210 kg/m<sup>2</sup> et 131 kg/m<sup>2</sup>. On peut donc estimer des quantités correspondant à 17 857 m<sup>2</sup> de briques de maçonnerie et 183 206 m<sup>2</sup> de briques de parement disponibles pour l'année 2020, en Ile de France, pouvant être réemployées dans des travaux de constructions neuves et réhabilitation.

Tous ces résultats sont représentés sur un diagramme de Sankey que nous avons développé à partir d'un programme python diffusé par plotly.com.

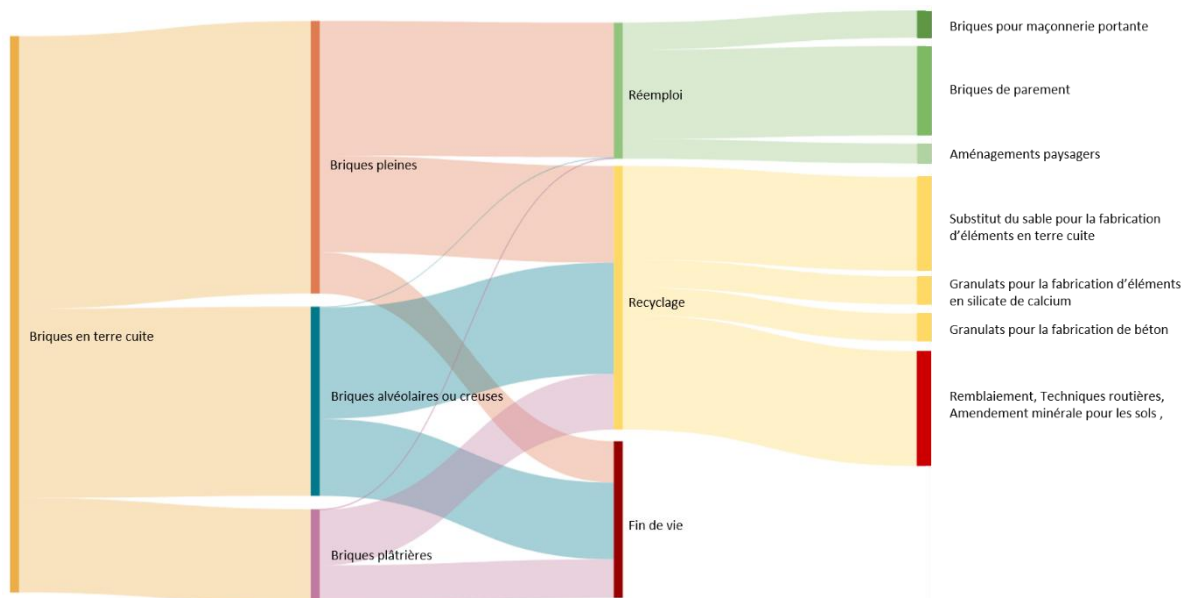


Figure 3: Flux de valorisation des briques pour la région Ile-de-France en 2020, en vert les usages avec les qualités fonctionnelles supérieures (conservation de l'intégrité du produits), en rouge avec les qualités fonctionnelles inférieures (les produits sont détruits pour ne constituer que de la matière).

La figure 3 représente, par une largeur proportionnelle à la masse mise en œuvre à chaque étape, les différentes données d'entrée ainsi que les différents débouchés possibles pour ces briques.

### 3.2 Limites et opportunités de recherche

Les résultats ci-dessus sont le fruit de plusieurs approximations qui altèrent les données finales. En effet, la recherche bibliographique fournit parfois des données chiffrées sur les taux de réemploi et de

recyclage sans préciser à quelle échelle ils s'appliquent (données nationales, régionales...). Il n'est donc pas toujours facile de définir le périmètre de la donnée ainsi collectée alors que notre étude se concentre sur un territoire particulier.

De plus, les données fournies par la littérature prennent généralement en compte le contexte actuel, elles intègrent donc les freins réglementaires, économiques et assurantiels actuels. Les données estimées par la méthode de cet article ne sont ainsi que des approximations et méritent de garder à l'esprit que les taux théoriques peuvent être sous ou surestimés.

Des rayons d'opération des différentes filières ont été estimés en termes de distance autour d'un chantier (30 km pour le réemploi). Or, le modèle BTPflux ne permet actuellement que de quantifier les déchets au niveau national, régional, départemental ou de la commune. L'idéal serait donc de s'affranchir des limites territoriales (département, région, par exemple) car les rayons d'opération et le découpage territorial ne coïncident pas toujours et peuvent induire des erreurs.

Certains auteurs ont évalué l'impact environnemental de leur scénario (composants recyclés, ou réemployés après la déconstruction), c'est le cas notamment d' Ajayebi et al. (2020) et de Yang et al. (2022) qui ont réalisé une analyse de cycle de vie des pratiques d'économie circulaire dans la mise en place de mines urbaines. Alors que ces dernières sont nées de préoccupations environnementales, il paraît important de pouvoir établir l'impact de cette pratique sur d'autres aspect que l'épuisement des ressources. L'étude de Stephan & Athanassiadis (2018) souligne que privilégier le réemploi ou le recyclage peut permettre des économies de ressources, d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre, et l'évaluation de ces économies permet aux décideurs de mieux comprendre les enjeux de telles stratégies de gestion des déchets. Ajayebi et al. (2020) ont également souligné le fait que la récupération et la valorisation des produits de construction doivent être bénéfiques sur le plan environnemental, ce que la présente étude n'a pas cherché à évaluer. Néanmoins, nous avons cherché à recueillir les impressions des acteurs du secteurs lors des entretiens sur ce sujet. Ces derniers ont surtout pointé du doigt le transport comme source d'impact environnemental de leur activité et même si ce dernier restait inférieur à celui d'un produit neuf, ils soulignent l'intérêt d'établir des distances critiques au-delà desquelles l'impact généré par le transport dépassent les bénéfices du réemploi ou du recyclage par rapport à d'autres pratiques (incinération, enfouissement). Il peut également être pertinent de comparer l'impact des différentes filières afin d'évaluer lesquelles sont les plus adaptées à chaque produit.

Une étude par composant peut également indiquer quels sont ceux qui permettent les plus grandes économies. D'après un acteur que nous avons rencontré, la masse des éléments du second œuvre sur un de leur chantier ne représentaient que 0,2% de la totalité des déchets des bâtiments déconstruits mais le réemploi de ces matériaux du second œuvre a permis d'économiser 15% des tonnes équivalents CO<sub>2</sub> émis par le chantier (Gentil *et al.*, 2021).

Le potentiel économique est également discuté dans certaines études (Ajayebi *et al.*, 2020; Zhou *et al.*, 2020) ce que nous n'avons pas considéré ici. La prise en compte de ce critère pourrait être une perspective à ce travail d'autant plus que des études récentes et nos entretiens ont montré que, même avec un besoin en main-d'œuvre plus important, les filières de valorisation pouvaient être bénéfiques sur le plan économique pour certains produits. L'économie circulaire sera sûrement plus discutable pour des composants ayant un coût très faible. Néanmoins, dans un contexte d'épuisement des ressources, les enjeux économiques pourraient potentiellement passer au second plan et ne plus être une préoccupation majeure.

Enfin, une autre dimension prospective du projet serait d'estimer les quantités de déchets pouvant être générés dans le futur permettant ainsi aux décideurs d'établir des plans de gestion des déchets sur une longue période.

#### **4 CONCLUSION**

Afin de gérer de manière plus durable les quantités de ressources consommées et de déchets produits, les stocks de matériaux méritent une plus grande attention dans les recherches sur les mines urbaines. En effet, l'élaboration de stratégies d'économie circulaire passe par une étude approfondie des dynamiques du stock que constitue le parc immobilier dans différents cadres spatiaux. Cette étude propose d'établir une méthode pour quantifier, pour chaque type de produit, les flux sortants du parc immobilier dans le cadre de démolitions ou de rénovations, recensant et quantifiant les différentes filières de valorisation matière (réemploi, recyclage) ainsi que les usages secondaires de ces flux. Ces derniers ont été exprimés en unité fonctionnelle pour permettre aux décideurs de comparer leur disponibilité avec la demande en produits et équipements de construction (un besoin sera exprimé en nombre de fenêtres, par exemple et non en kg de fenêtre). Pour considérer spatialement les gisements les plus adaptés, cette comparaison doit se faire dans le périmètre d'opération des différentes filières. Le cas des briques en Ile-de-France a montré qu'en favorisant le

réemploi puis le recyclage, plus de 21 000 m<sup>2</sup> de murs de structure en briques pourraient être rebâti et que 9,2kt de granulats pourraient servir à fabriquer du béton.

La méthode proposée pourrait également être utilisée pour déterminer les matériaux qui vont sortir du stock en grandes quantités et envisager leur exploitation comme ressources. Selon Yang et al. (2022), beaucoup de briques pleines en terre cuite sont déconstruites mais elles sont peu demandées pour de nouvelles constructions. En cas de pénurie de ressources, les politiques publiques pourraient encourager le réemploi des produits qui ne sont plus utilisés, mais cet objectif peut entrer en contradiction avec les objectifs de performances thermiques des bâtiments. En outre, la prévention des déchets doit être privilégiée avant d'autres modes de gestion de ces derniers (allonger la durée de vie des produits, moins de gaspillage sur les chantiers, éco-conception, favoriser le réemploi...). La conception de nouveaux bâtiments peut se faire en considérant les freins et les leviers à la valorisation des produits les composant. Par exemple, il peut être choisi de ne plus utiliser de mortier colle ou de ciment pour assembler les murs en briques de façon à en faciliter la dépose sélective. Par ailleurs, plusieurs acteurs interrogés ont soulevé le fait que la réglementation de la construction n'était pas toujours adaptée au réemploi, alors que cette pratique était jusqu'à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle davantage appliquée (Lachat, 2022). Tous ces éléments peuvent guider les décideurs dans la mise en œuvre des filières de valorisation afin de rendre le secteur du bâtiment plus circulaire.

## **5 REMERCIEMENTS**

Les auteurs remercient le groupement d'intérêt scientifique EEDEMS pour le financement du stage de Sarah Clavier ainsi que l'ANRT pour le financement de la thèse CIFRE de Nada Bendahmane (convention CIFRE N° 2020/0534). Les auteurs remercient également les deux rapporteurs anonymes qui ont permis d'amender la première version ainsi que Benjamin Darçot pour son aide au développement informatique.

Cette recherche contribue à l'ODD 11 – Villes et communautés durables

## **6 REFERENCES**

- ADEME (2020). Déchets chiffres-clés, L'essentiel 2020.
- ADEME (2021). Transition(s) 2050, choisir maintenant agir pour le climat.
- A. Ajayebi, P. Hopkinson, K. Zhou, D. Lam, H.M. Chen et Y. Wang (2020). Spatiotemporal model to quantify stocks of building structural products for a prospective circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, **162**, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105026>.

M. Arora, F. Raspall, L. Cheah et A. Silva (2020). Buildings and the circular economy: Estimating urban mining, recovery and reuse potential of building components. *Resources, Conservation and Recycling*, **154**, 2-8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104581>.

M. Arora, F. Raspall, L. Fearnley et A. Silva (2021). Urban mining in buildings for a circular economy: Planning, process and feasibility prospects. *Resources, Conservation and Recycling*, **174**, 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105754>.

M. Bazzana, D. Monfort et J. Rodrigues (2018.) Base de données ratios matériaux et déchets.

A. Bauby, D. Florentin, V. Chatain (2022) L'épreuve du tri sur site des déchets de la construction. *Environnement, Ingénierie & Développement*, n°86, <https://doi.org/10.46298/eid.2021.8336>

CDR Construction (sans date). Manuel de démontage avec une finalité de réemploi, briques.

CSTC (2019). Chantiers pilotes de gestion innovante des déchets de construction à Bruxelles.

Démocles (sans date). La valorisation des briques plâtrières. <https://www.democles.org/fiche/briques-platrieres/> (Consulté le: 7 avril 2022).

A. di Maria, J. Eyckmans, et K. van Acker (2018). Downcycling versus recycling of construction and demolition waste: Combining LCA and LCC to support sustainable policy making. *Waste Management*, **75**, 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.028>

FCRBE (2021). FICHES MATÉRIAUX, REUSE TOOLKIT. [www.opalis.eu](http://www.opalis.eu) (Consulté le: 14 avril 2022).

P. Gentil, C. Magnin-Feysot et J. Rochet (2021). OPÉRATION PILOTE CADRAN SOLAIRE - Démarche expérimentale de déconstruction sélective. *EPFL Dauphiné*, [http://www.epfl-dauphine.fr/cms\\_viewFile.php?idtf=495&path=rapport\\_Cadrex.pdf](http://www.epfl-dauphine.fr/cms_viewFile.php?idtf=495&path=rapport_Cadrex.pdf)

Institut Paris Région (2021). BÂTIR L'AMÉNAGEMENT CIRCULAIRE. *Les carnets pratiques de l'institut Paris Région*, **12**, 1-116.

A. Koutamanis, B. van Reijn et E. van Bueren (2018). Urban mining and buildings: A review of possibilities and limitations. *Resources, Conservation and Recycling*, **138**, 32-39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.024>.

F. Krausmann, D. Wiedenhofer, C. Lauk, W. Haas, H. Tanikawa, T. Fishman, A. Miatto, H. Schandl, et H. Haberl (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **114**(8), 1880-1885. <https://doi.org/10.1073/pnas.1613773114>.

A., Lachat, K., Mantalovas, T., Desbois, O., Yazoghli-Marzouk, A.-S., Colas, G., Di Mino, A., Feraille (2021). From Buildings' End of Life to Aggregate Recycling under a Circular Economic Perspective: A Comparative Life Cycle Assessment Case Study. *Sustainability* **13**,9625. <https://doi.org/10.3390/su13179625>

A., Lachat, (2022) Le Réemploi Appliqué au Domaine de la Construction : Principe, Impact Environnemental et Mesure dans le Cadre d'une Économie Circulaire. Thèse de doctorat de l'École des Ponts ParisTech. 379p. <https://www.theses.fr/s232563>

MTE (Ministère de la Transition Ecologique) (2020a). Déchets du bâtiment. <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-du-batiment> (Consulté le: 13 juin 2022).

MTE (Ministère de la Transition Ecologique) (2020b). L'économie circulaire. <https://www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire> (Consulté le: 13 juillet 2022).

SDES (Service des Données et Etudes Statistiques) (2021). Bilan environnemental de la France. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/bilan-environnemental/16-production-de-dechets-et-recyclage> (Consulté le: 13 juin 2022).

SEDDRe et ADEME (2020). Etude sur les pratiques de tri sur les chantiers de déconstruction. [www.ademe.fr/mediatheque](http://www.ademe.fr/mediatheque).

SEDDRe et Crowe Sustainable Metrics (2018). Empreinte carbone de la valorisation des déchets du bâtiment en France.

A. Stephan, et A. Athanassiadis (2018). Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resources, Conservation and Recycling*, **129**, 248-262. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.022>.

R. Tirado, A. Aublet, S. Laurenceau, M. Thorel, M. Louërat et G. Habert (2021). Component-based Model for Building Material Stock and Waste-Flow Characterization: A Case in the Île-de-France Region. *Sustainability (Switzerland)*, **13(13159)**, 1-34. <https://doi.org/10.3390/su132313159>.

X. Yang, M. Hu, C. Zhang et B. Steubing (2022). Urban mining potential to reduce primary material use and carbon emissions in the Dutch residential building sector. *Resources, Conservation and Recycling*, **180**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106215>.

K. Zhou, H.M. Chen, Y. Wang, D. Lam, A. Ajayebi et P. Hopkinson (2020). Developing advanced techniques to reclaim existing end of service life (EoS) bricks – An assessment of reuse technical viability. *Developments in the Built Environment*, **2**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/J.DIBE.2020.100006>.