

Quel écosystème de données pour un passeport matériau BIM ? Revue de la littérature et perspectives pour de futures recherches

Amélie Halbach^{1*} et Aurélie de Boissieu¹²

¹LNA, Faculté d'Architecture, ULiège, Belgique ²LUCID, Faculté des Sciences Appliquées, ULiège, Belgique

Abstract. Dans un contexte environnemental en crise, le secteur de la construction est un important consommateur de matières premières et producteur de déchet. Il fait donc l'objet de diverses études et actions visant à le faire entrer dans une démarche d'économie circulaire. En particulier, les informations en lien avec les matériaux de construction sont cruciales tout au long de cycle de vie du bâtiment. La définition et le maintien de ces informations au travers de « passeports matériaux » (PM) présentent des opportunités riches et foisonnantes, en particulier en lien avec les pratiques du Building Information Modeling (BIM). Mais force est de constater que la définition de ces PM BIM et leur implémentation restent à leur début et rencontrent de nombreuses difficultés. Cet article propose une analyse de la littérature scientifique sur les PM BIM. On identifie les mises en œuvre actuelles du PM BIM et leurs difficultés, mettant en avant l'importance d'interroger la structuration et le contenu du PM. Cet article identifie le potentiel mais aussi les possibles blocages de l'utilisation de PM BIM en vue de supporter la définition de futures directions de recherche.

1 Introduction

Le secteur de la construction est un important consommateur de matières premières et producteur de déchets, et fait donc l'objet de diverses études et actions visant à le faire entrer dans une démarche d'économie circulaire[†] à une échelle mondiale [1], mais aussi à l'échelle de la Belgique [2-3]. Malgré ces nombreuses initiatives, l'adoption d'une approche d'économie circulaire incluant la fin de vie durable dans le secteur de la construction fait face à de nombreux obstacles [4-5]. Le manque d'information sur les possibilités de circularité des matériaux de construction en fin de vie est souvent cité dans la littérature comme la principale raison de l'application limitée du concept de durabilité dans ce secteur [6-7].

Ce manque d'information s'explique notamment par le fait, qu'à la différence d'autres secteurs industriels, un bâtiment est un assemblage complexe de nombreux matériaux et composants, dont la taille et la durée de vie sont plus grandes et plus longues que celle de la plupart des autres produits manufacturés [5, 8-9]. Tout au long de l'élaboration du projet, de sa construction, des interventions sur le bâtiment en phase d'exploitation et de son démantèlement, les données doivent être parfaitement conformes à la réalité pour assurer le

* amelie.halbach@uliege.be

[†] Le principe de l'économie circulaire (EC) est de conserver la valeur des produits et matériaux en circulation aussi longtemps que possible. Dans le secteur de la construction, l'économie circulaire peut se fonder sur 3 grands piliers : (1) concevoir & construire circulaire (plan & concept, séparer les strates, choix des matériaux, assemblages, ...), (2) modèles économiques (économie de la fonctionnalité, du partage, extension de la durée de vie, ...), (3) urban mining (recycler, refabriquer, réemployer, déconstruire, ...) [46].

démontage et le réemploi des composants [10]. L'amélioration de cette documentation est un levier extrêmement important de la transition d'une économie linéaire à une économie circulaire [7, 9, 11-16]. En effet, les dispositifs de médiation traditionnels (plans, détails, cahiers des charges, ...) ne sont pas prévus pour fournir une documentation conforme et transparente concernant leurs matériaux et composants [9, 17].

C'est dans ce cadre que le BIM (Building Information Modeling) apparaît comme particulièrement adapté pour répondre à cette problématique [6-7, 18-20]. Le BIM est l'ensemble des processus de gestion de l'information relative aux bâtiments et ouvrages de génie civil [21]. Il permet une meilleure gestion de ces données tout au long du cycle de vie du bâtiment et de meilleures pratiques collaboratives entre les différents acteurs de la construction, organisées autour de la production et l'échange de ces données. Ces données prennent le plus souvent la forme de modèles numériques contenant à la fois des informations géométriques et des informations sémantiques. Le choix du format de ces données et de leurs caractérisations a une place centrale dans le bon fonctionnement du BIM. Cette caractérisation reste néanmoins difficile et, actuellement, les modèles BIM ne contiennent pas les informations nécessaires aux activités de planification de la déconstruction, tel que le désassemblage sélectif [17, 22]. L'idée de développer des PM numériques ou BIM a été développée depuis quelques années pour répondre (entre autres) à ce besoin de documentation [6-7, 22] et penser un écosystème de données pertinent pour supporter le développement de ces nouvelles pratiques.

Cet article propose une analyse de la littérature scientifique au sujet du PM et son implémentation dans le BIM. Cette analyse permet d'identifier les difficultés rencontrées ainsi que les leviers possibles pour faciliter l'approche du PM BIM. Plusieurs pistes de recherche sont ensuite proposées et discutées.

2. Définition, objectifs et potentialités du Passeport Matériau

2.1 Définition

Le Passeport Matériau (PM) est une notion émergente qui vise à fournir une méthode et une structure pour la collecte et le traitement des informations pertinentes du bâtiment et de ses composants, en vue de leur inscription dans une économie circulaire [13, 23-26]. Ces informations sont rarement couvertes par d'autres documents et valorisent les usages actuels et futurs de ces composants en permettant, en particulier, leur réutilisation ou leur recyclage en fin de vie [25].

D'après BAMB[‡], il faut bien noter que le PM n'est pas un certificat ou une évaluation en soi, mais un support qui fournit les informations nécessaires à la création de ce certificat et/ou évaluation. Développé tout d'abord sous le terme « Nutrient Certificate » en Allemagne en 1997 [7], le PM continue à évoluer et sa définition varie selon les sources.

2.2 Objectifs

Le PM se distingue des outils de documentation comme l'EPD[§], dont l'objectif principal est de cataloguer les impacts environnementaux d'un produit. En comparaison, le PM se

[‡] BAMB, acronyme signifiant "Buildings As Material Banks", est un projet initié dans le cadre du programme Horizon 2020 de l'UE (2015-2019). Le projet rassemble 15 partenaires, dont l'objectif était de permettre un changement systémique dans le secteur de la construction en créant des solutions circulaires. Plus particulièrement, le projet s'est intéressé aux PM et aux constructions réversibles [13, 25, 47-50].

[§] EPD (Environmental Product Declarations) : <https://www.environdec.com/home>

concentre sur la récupération de la valeur et l'optimisation des aspects circulaires, y compris l'impact sur la santé. Cela signifie que, dans le cadre du PM, la performance liée à l'impact environnemental est considérée comme une conséquence de l'action plutôt que comme un objectif de mesure en soi [24].

Au vu de la définition d'un PM, il est tentant de le comparer à une étiquette d'ingrédients apposée sur les produits alimentaires. Or, les PM ont un intérêt plus spécifique que de simplement fournir une liste d'ingrédients [24, 27]. Ainsi, Luscuere [24] donne cinq arguments : (1) les produits et leurs compositions sont complexes, (2) le nombre et les types de matériaux dans les bâtiments, qui sont pertinents pour la circularité, sont énormes, (3) identifier la localisation des matériaux dans le bâtiment est essentielle car il est indispensable de comprendre si, et comment, les matériaux peuvent être extraits, sans perdre leur potentiel de réemploi ou de recyclage, (4) les matières primaires présentes dans un bâtiment ont bien souvent été transformées en un produit de valeur supérieure, réduire un PM à une liste de matériaux revient à ignorer cette valeur ajoutée découlant de la transformation, (5) les produits évoluent tout au long de l'utilisation du bâtiment et le suivi de ces changements est un facteur clé pour disposer d'informations mises à jour sur la valeur des composants, tels que mis en œuvre dans le bâtiment.

De plus, les PM sont utiles tout au long du cycle de vie du bâtiment. En effet, les PM servent depuis la phase de conception (optimisation de la conception), pendant la phase d'avant-projet (optimisation de matériaux et d'éléments particuliers), mais aussi la phase d'exécution (documentation), la phase d'exploitation (évaluation des changements) et enfin, en phase de fin de vie, comme base de données répertoriant les matériaux dont le bâtiment est constitué [14].

2.3 Potentialités du PM BIM

La numérisation des PM dans le cadre de son inscription dans les processus BIM porte de très grandes potentialités. Entre autres, la facilité de partage d'information, le gain de temps, la réduction des erreurs et la traçabilité des données sont considérés comme des avantages considérables pour l'usage des PM tout au long du cycle de vie des bâtiments [7, 22, 28].

Malgré les avantages, à la fois du PM et du PM BIM, cités précédemment, le PM semble être encore peu utilisé dans le secteur de la construction et dans le BIM en particulier. A l'heure actuelle, le PM ne semble pas faire partie des discussions des différentes communautés BIM, telles que BuildingSmart** ou « BIM excellence »†. Par exemple, dans les usages BIM‡ identifiés par Succar et son équipe, dans le cadre de l'association « BIM excellence », on ne retrouve pas de mention de circularité en général, ni de déconstruction ou de PM en particulier.

Les raisons de ce manque d'adoption sont rarement discutées. C'est pour cette raison que cet article interroge les usages du PM (BIM et non BIM) tels que décrits par différents auteurs, afin d'identifier l'état de l'implémentation du PM BIM et les difficultés rencontrées.

** <https://www.buildingsmart.org/about/>

†† <https://bimexcellence.org/>

‡‡ <https://bimexcellence.org/wp-content/uploads/211in.FR-Tableau-des-usages-de-mod%C3%A8le.pdf>

3 Méthode de recherche

3.1 Méthode d'analyse et objectifs

La méthode d'analyse de cet article consiste en une revue de la littérature, où nous interrogeons : (1) l'état de la recherche scientifique sur le PM BIM et son implémentation, en particulier sous l'angle des approches développées; (2) le besoin en information du PM (BIM ou non), en particulier sous l'angle : (a) de sa structuration en différents niveaux: de l'échelle de la ville à celle du bâtiment et aux matériaux et les liens entre eux; et (b) de son contenu en termes d'informations nécessaires.

3.2 Sélection du corpus scientifique

Scopus^{§§} est une base de données d'articles scientifiques reconnue comme étant la plus complète sur les domaines étudiés dans cet article. En y menant une recherche liée à la circularité dans le secteur AECO^{***}, nous obtenons une sélection de près de 290.000 articles et publications. Concernant le BIM^{†††}, la recherche donne plus de 15.500 résultats. En croisant ces deux domaines^{‡‡‡}, la sélection ne propose plus que 135 résultats (fig.1).

En parallèle, une recherche avec le mot clé « Material Passport »^{§§§} a permis d'identifier 32 articles. Parmi ces 32 articles, 7 n'ont pas été conservés pour l'analyse car : (1) ils n'étaient pas propres à l'industrie de la construction (1 article) ; (2) il s'agissait de revues de la littérature (2 articles); (3) l'article n'était pas en anglais (1 article); (4) ils n'étaient pas en « open acces » (3 articles).

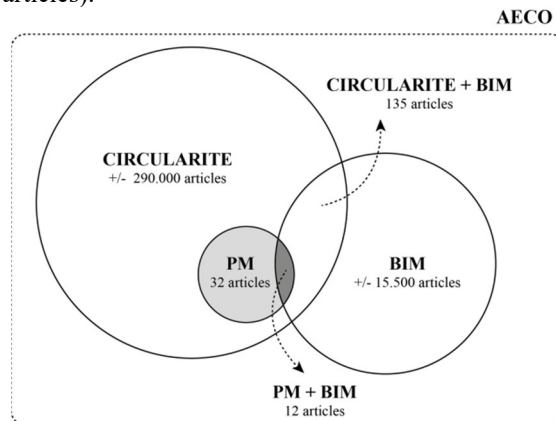


Fig. 1. Sélection via Scopus des articles en lien avec la circularité, la BIM et le PM

§§ <https://www.scopus.com/>

*** TITLE-ABS-KEY (circular*) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATE") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ARTS"))

††† (TITLE-ABS-KEY (BIM) OR TITLE-ABS-KEY ("Building Information Model*")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATE") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ARTS"))

‡‡‡ (TITLE-ABS-KEY (bim) OR TITLE-ABS-KEY ("Building Information Model*")) AND TITLE-ABS-KEY ("circular*") AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATE") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "EART") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENVI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENER") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ARTS"))

§§§ TITLE-ABS-KEY ("material* passport*")

Le corpus de la présente recherche se constitue donc de 25 articles (32 moins les 7 exclus), abordant des questions liées au PM pour l'AECO (BIM ou non). Parmi ces articles, 12 évoquent un lien avec le BIM : [5-7, 14, 16, 18, 20, 29-33]. Il est également important de noter que parmi ces 12 articles, 7 sont co-écrits par les auteurs Honic M. et Kovacic I. : [14, 16, 18, 30-33]. Ces constatations démontrent la faible considération du PM BIM dans la littérature scientifique. Nous observons également que certaines sources détaillent le PM plus que d'autres. Même si le niveau de détail est différent, l'ensemble des références est utilisé dans le travail d'analyse.

4. Analyse de la mise en œuvre du PM BIM

Ces 25 articles, abordant le PM, adoptent des approches différentes, même si des récurrences peuvent être identifiées (tableau 1).

Tableau 1. Approche des articles en lien avec le PM et le PM BIM

	Méthodes de PM BIM implémentées					PM
	Maquette BIM	Maquette BIM et outil tiers externe	BIM et SIG	Block-chain	Non renseigné	Sans lien BIM
Approche seulement théorique						
Proposition théorique conception	[31]	[18]	[29]		[6]	[8, 26, 34-38]
Proposition théorique FM*/déconstruction	Non identifié dans la littérature					
Proposition théorique cycle de vie global	[20]	[7]		[5]		[24]
Cas d'étude théorique conception		[16, 33]				[11, 39]
Cas d'étude théorique FM/déconstruction	Non identifié dans la littérature					[40]
Cas d'étude théorique cycle de vie global	Non identifié dans la littérature					
Approche appliquée à un cas réel						
Cas d'étude pratique conception	Non identifié dans la littérature					[12]
Cas d'étude pratique FM/déconstruction		[14, 30]				
Cas d'étude pratique cycle de vie global	[32]					[15]

*FM : Facility Management

Par définition, le PM s'inscrit dans une démarche de circularité (fig. 1)[13, 23-26]. En théorie, les articles devraient donc tous analyser le cycle de vie global des composants. Or, nous constatons que la plupart des articles sont avant tout orientés vers la phase de conception. En effet, les PM sont mis en œuvre lors de la phase de conception et sont destinés à optimiser le cycle de vie. Cependant, l'expérimentation ne se fait que lors de cette phase et il y a peu de retour lors des phases ultérieures : construction, exploitation/maintenance et déconstruction. On peut le regretter face aux enjeux du sujet, mais cela peut s'expliquer par le fait qu'au vu du temps long, inhérent au secteur de la construction [5, 8-9], les études ont peu de recul par rapport aux phases suivantes.

Au sein de la littérature analysées nous distinguons deux types d'approche: (1) les recherches abordant la problématique par une approche théorique, et d'autre part (2) des études appliquées à un cas réel. Les approches théoriques s'intéressent principalement à la mise en œuvre du BIM en phase de conception, alors que les approches appliquées à des cas réels portent plutôt sur des bâtiments existants. Il est intéressant de noter que seuls 3

articles, sur les 25 identifiés, s'intéressent à des cas réels. De plus, ces 3 articles sont co-écrits par les auteurs Honic M. et Kovacic I. [14, 30, 32].

Concernant le PM BIM, nous identifions plusieurs méthodes de mises en œuvre. Les principales expérimentations menées (théoriques ou appliquées), montrent comment l'utilisateur peut encoder et contrôler les données requises via un modèle BIM [20, 31-32], pour généralement ensuite les organiser et les personnaliser grâce à des programmes tiers [7, 14, 16, 18, 30, 33]. On notera que les programmes tiers utilisés dans ces expérimentations sont assez généralistes (type Dynamo**** ou Excel††††) et non spécifiques au PM, ni aux phases d'exploitation et de maintenance du bâtiment [31-32]. De manière générale, nous observons que les implémentations expérimentales du PM BIM visent principalement à faciliter la documentation du PM, mais aussi parfois à automatiser l'évaluation de certains indicateurs inclus dans le PM [7, 14].

Nous constatons également qu'il n'y a pas de consensus sur le contenu des données et pas ou peu de description fine et exhaustive des données elles-mêmes. Le contenu des données du PM, ainsi que les données quantitatives et les indicateurs qualitatifs, seront analysés au point 5.2.

Enfin, la question du format de la donnée est encore peu interrogée dans ces recherches, ce dont on peut s'étonner au vu de la multiplicité des informations nécessaires dans un PM, des acteurs concernés, ainsi que de l'importante nécessité de pérennité dans le temps. En particulier, l'ouverture des formats de données utilisés et son inscription dans une stratégie « d'open BIM » [41], semblent indispensables pour assurer la pérennité et l'interopérabilité des informations du PM. La réutilisation de formats de données existants permettrait d'assurer l'utilisabilité de celle-ci. Dans la littérature, on relève le manque de maturité de cette méthode et sa difficulté à être mise en œuvre.

Ces conclusions confirment ce qui semble s'observer dans la pratique, où seulement quelques projets expérimentaux ont été réalisés en intégrant le concept de PM. Citons par exemple Liander, RAU Architects, 2011-2015 [27], Brummen Town Hall, RAU Architects, 2011-2013 [27, 42], et Circular Building, Arup, 2016 [43-44]. Cependant, il s'agit encore d'une suite de projets témoins, où le PM reste hétérogène et ne s'appuie que peu sur les travaux de recherche. Ces observations seraient à approfondir dans des recherches ultérieures.

A l'heure actuelle, la définition précise du contenu du PM ainsi que les moyens de sa mise en œuvre sur un projet restent donc floues : (1) on retrouve dans la littérature des définitions incomplètes, voire contradictoires, (2) on observe très peu de mise en œuvre des PM BIM dans la pratique et encore moins de consensus à ce propos. Ces difficultés sont un frein majeur à une implémentation du PM dans l'industrie en général et dans les méthodologies BIM en particulier.

5 Analyse des niveaux et du contenu du PM dans la littérature

Après ces premiers résultats sur l'implémentation des PM BIM et les difficultés rencontrées, cette section interroge les données nécessaires du PM.

Nous nous appuyons sur le même set de 25 articles pour interroger les niveaux et les contenus des PM. Les résultats de l'analyse sont par la suite également mis en perspective avec le rapport de recherche issue de BAMB [13]. En effet, comme évoqué précédemment,

**** <https://dynamobim.org/>

†††† <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>

BAMB est un projet de recherche européen ayant réalisés des études approfondies sur la question du PM. Au vu de l'importance de celles-ci dans le paysage actuel de la recherche sur les PM, leur travail est donc également considéré dans l'analyse des niveaux et du contenu du PM.

5.1 Analyse des niveaux possibles du PM

A l'instar des poupées Matryoshka (poupées russes traditionnelles), les PM sont souvent constitués d'un produit à l'intérieur d'un produit à l'intérieur d'un produit [25]. Le défi des passeports est de rendre cette complexité intelligible et les informations aisées à gérer. Les PM peuvent donc être établis à différents niveaux et, d'après notre revue de la littérature, nous en identifions cinq principaux (fig.2).

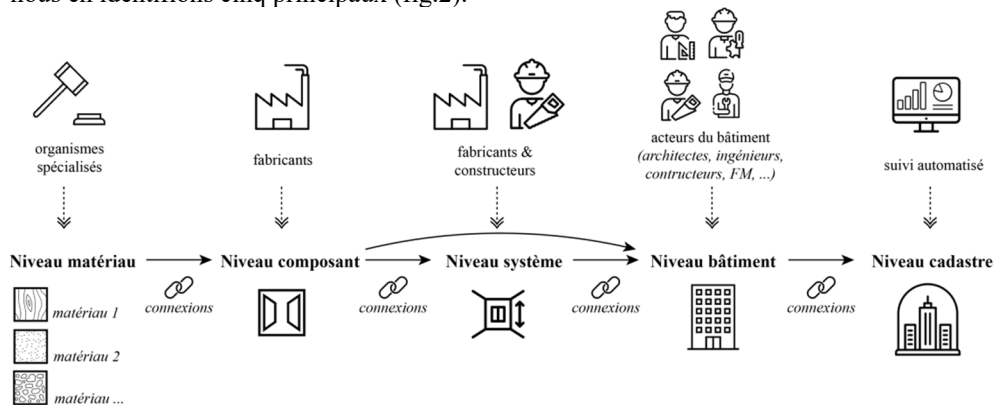


Fig. 2. Niveaux et articulations du Passeport Matériau

- Le niveau *matériau* est utilisé pour décrire la matière première ou les matériaux génériques, tels que les métaux, le bois, la terre, les pierres (granit, marbre, basalte, etc.), mais qui sont anonymes et non considérés comme des produits spécifiques en soi [25]. Selon les classifications analysées, les PM matériaux décrivent donc la composition du matériau lui-même. Ces PM sont définis par des organismes spécialisés.

- Le niveau *composant* ou *produit* fait référence à un objet qui a été fabriqué ou transformé pour la vente, comme par exemple un carrelage, un revêtement de sol, une plaque de plâtre, une porte, la tuyauterie, l'éclairage, etc. [25]. Ce PM répertorie tous les matériaux présents dans le composant [11]. Un composant est un matériau transformé et vendu par un fabricant comme un produit, sous une certaine marque, avec par exemple un numéro de série, documenté par un ou plusieurs PM matériau. Ces PM sont définis par les fabricants.

- Dans le contexte de PM, un *système* est un ensemble composé de multiples composants provenant de différents fabricants, qui pourraient également être utilisés comme des produits indépendants avec leurs passeports individuels. Il s'agit par exemple de produits utilisés dans les systèmes mécaniques, électriques, de plomberie ou de façades qui contiennent une large gamme d'autres matériaux et produits dans leur composition [13]. Citons l'exemple du mur rideau, qui contient des composants divers (châssis, vitres, voire des éléments structurels), issus de différents fabricants mais mis en œuvre par une même entreprise. Un PM système est constitué de tous les PM composants présents dans le système.

- Le PM *bâtiment* est constitué de l'ensemble des PM systèmes et composants mis en œuvre dans le bâtiment concerné [11]. Ce PM reprend donc tous les PM vus

précédemment : système, composant et matériau [18]. On y retrouve également des informations complémentaires (voir tableau 2), comme l'historique des composants et leur localisation dans le bâtiment, ainsi que des informations sur les assemblages des composants entre eux.

- Dans la littérature, les PM se limitent généralement à l'échelle du bâtiment [9] mais certains auteurs comme Çetin, Wolf & Bocken [6] et Heinrich & Lang [13], y ajoutent un niveau supplémentaire pour représenter l'échelle urbaine. Ce niveau consolide les informations de matériaux à l'échelle d'un territoire et vise à créer un *cadastre des ressources* pour entrer dans un concept d'urban mining (« Buildings as Material Bank ») [33]. Dans ce contexte, citons notamment Madaster, une plateforme néerlandaise créée en 2017 [45].

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons en particulier au PM au niveau du bâtiment, tout au long de son cycle de vie.

5.2 Analyse comparative des informations incluses dans le PM dans la littérature scientifique

5.2.1 Des catégories d'information contradictoires entre les auteurs

Nous remarquons que la plupart des informations à intégrer dans un PM sont récurrentes chez les auteurs analysés, et ce malgré le fait que certaines sources soient plus détaillées que d'autres. Cependant, chaque auteur interprète les données de manière différente et, de ce fait, définit des sous-catégories d'information divergentes. Par exemple, Munaro et al. [12] situent les instructions de transport et stockage dans la sous-catégorie « guide de désassemblage », alors que Heinrich & Lang [13] et Hoosain [35], créent une sous-catégorie spécifique pour ces données. Une unification des sous-catégories semble indispensable afin de faciliter l'usage du PM et son intégration dans le processus BIM.

Dans cette recherche, nous nous sommes pris le parti de nous attacher à la spécification des informations en nous détachant des sous-catégories contradictoires proposées par les auteurs pour en proposer d'autres, qui nous permettent de structurer et rassembler les différentes informations relevées comme nécessaires au PM dans les 25 articles analysés.

5.2.2 Informations récurrentes composant le PM

Le tableau 2 regroupe les informations récurrentes identifiées dans le corpus scientifique. Elles y sont regroupées en sous-catégories thématiques proposées dans le cadre de cet article. Les correspondances entre la recherche BAMB [13] et l'analyse proposée ici, sont indiquées dans une colonne spécifique.

Tableau 2. Informations récurrentes composant le PM

DONNEES IDENTIFIEES	Niveau de consensus*	BAMB
Identification du composant et propriétés géométriques :		
Nom, type, localisation (du composant dans le bâtiment, du bâtiment dans la ville) [5-6, 8, 11-12, 15, 18, 24, 29, 36, 38]	11	X
Dimensions, volume, poids, densité, quantité [6-8, 11, 14-15, 18, 29, 34, 38]	10	X
Propriétaire [6]	1	X
Propriétés:		
Nom du fabricant, ID, marque [5, 8, 12, 15, 34]	5	X

Date de fabrication / mise en service [38]	1	X
Fonction initiale/principale du produit [8, 29, 34]	3	X
Données structurelles : stabilité, résistance à la compression [34-35]	2	X
Données physiques : performances thermiques (valeur U), acoustique, porosité, étanchéité à l'air [34]	1	X
Informations optiques : couleur, structure, surface, transparence		X
Composition chimique / composition du matériau		X
Toxicité des matériaux [7, 12, 15, 36]	4	X
Matériau traité ou non [7]	1	X
Résistance au feu [34]	1	X
Standardisation / préfabrication [7]	1	X
Provenance du matériau initial, également s'il s'agissait de réemploi [8, 15,36, 38]	4	
Impact environmental: GWP (global warming potential), AP (acidification potential), PEI (primary energy intensity) / déclaration environnementale / labels et certification [5, 7, 11-12, 14, 16, 18, 24, 32-33, 36]	11	X
Durée de vie / durée de vie estimée [8, 11, 15, 29]	4	X
Garanties / qualité [15, 34, 38]	3	X
Coût [5]	1	
Photo du produit [8]	1	X
Historique du composant : [5-6, 16, 34, 36]		
Fonction(s) [38]	1	
Période d'utilisation [12, 29]	2	
Historique des expositions grâce au monitoring		X
Influences externes: feu, inondations et intempéries [12, 15, 38]	3	X
Vérifications faites pendant la durée de vie du produit [12]	1	
Dernières opérations et modifications réalisées [12, 15-16]	3	
Mises-à-jour durant la période d'utilisation [12, 15-16]	3	
Informations d'exploitation et de maintenance :		
Disponibilité de pièces de rechange		X
Détails de connexion et leurs particularités [7, 12, 15, 29]	4	X
Instruction de maintenance et de nettoyage [12]	1	X
Avertissement et recommandation en lien avec la sécurité et la santé [7, 12, 24, 34, 35]	5	X
Qualité de l'air intérieure [24]	1	X
Acteurs impliqués dans le cycle de vie		X
Informations liées à la fin de vie et au réemploi :		
Accessibilité des matériaux [11, 15, 18, 24]	4	
Instructions de démontage (Design for Deconstruction) [7, 11-12, 15, 24, 34-35]	7	X
Instruction sur la fin de vie / instruction de mise en décharge [12, 15, 18, 24,29,35]	6	X
Potentiel de réutilisation/recyclage/compostage [5, 7, 11-12,14-16,18,29,32,34,35]	12	X
Instructions d'installation / instruction d'assemblage (pour un réemploi futur) [7, 12, 34, 36]	4	X
Instructions d'extraction du bâtiment ou de séparabilité [24, 34-35]	3	X
Instructions logistiques : manipulation, transport, stockage [7, 12, 24, 34-35]	5	X
Sécurité : équipement de protection et outils nécessaires au (dés)assemblage [7,36]	2	X
Utilisation future définie / options de seconde vie [7, 15]	2	X
Valeur résiduelle		X
Indicateurs de durabilité :		
Analyse de cycle de vie ou ACV [7, 14, 18, 24, 33]	5	X
Indicateurs de circularité [7-8, 15, 33,-34]	5	
Indicateur de l'efficacité du recyclage [8, 11, 14-16, 18]	6	
La part de matières premières renouvelables et non-renouvelables [15, 36]	2	X

*Légende niveau de consensus : > 6 citations = élevé ; 3-6 citations = moyen ; < 3 citations = réduit

Nous remarquons que certaines de ces informations font pratiquement l'unanimité (tableau 2, consensus élevé). C'est le cas, par exemple, du « potentiel de réutilisation/recyclage/ compostage ». D'autres sont largement citées ; c'est le cas de la plupart des informations liés aux matériaux ainsi qu'aux informations de fin de vie et de

réemploi. Ceci était attendu car l'objectif principal des PM est de faciliter le réemploi en fin de vie [13, 23-26]. Il est intéressant de noter que l'on ne retrouve tout de même pas d'unanimité complète sur aucune information, ni même de correspondance ou de tendance entre les auteurs. Ceci est probablement dû au manque de précision de certains articles.

Le consensus concernant d'autres informations semble plus réduit et relever d'un intérêt spécifique à une approche. C'est le cas, par exemple, des informations liées à la résistance au feu [34], à la sécurité (équipement de protection et outils nécessaires au désassemblage) [7-36], à la qualité de l'air intérieure [24], ou encore des informations visuelles (couleur, structure, surface, transparence) proposées par Heinrich et al. [13].

D'un point de vue général, le travail d'analyse et de consolidation dans notre article nous permet d'identifier toutes les informations nécessaires selon les différentes études portant sur le PM, quelle que soit l'approche choisie. Il en résulte un tableau extensif, organisé en 6 catégories permettant de rendre compte de la multiplicité des informations identifiées dans l'état de l'art: (1) identification, (2) propriétés, (3) historiques, (4) informations d'exploitation-maintenance, (5) informations de fin de vie et réemploi; et enfin (6) indicateurs de durabilité. Ces informations sont de 3 types: (1) des informations de caractérisation telles que définies par les fabricants (fig. 2), incluant les propriétés générales des composants et des matériaux ainsi que leurs instructions de mise en œuvre ; (2) des informations de traçabilité des opérations effectuées sur ces composants et leur exploitation maintenance; ainsi que (3) des indicateurs de durabilité, qui sont interrogés plus en détails dans le paragraphe suivant.

5.2.3 Données quantitatives et indicateurs qualitatifs

A l'heure actuelle, la plupart des outils de PM développés se limitent à donner des indicateurs quantitatifs. Or, pour certains auteurs [7, 8, 11, 15, 33, 34], les PM ne peuvent pas se contenter de ceux-ci, mais doivent également inclure des indicateurs qualitatifs. Ces indicateurs sont une première évaluation des performances de durabilité du composant et visent à fournir aux acteurs du projet, un outil de décision efficace pour tirer profit des éléments de construction au cours des différentes étapes de leur cycle de vie [11]. Si de multiples indicateurs environnementaux existent à l'échelle du matériau et du composant, il n'y a actuellement pas de consensus sur les indicateurs à inclure dans le PM à l'échelle du système et du bâtiment (fig. 2).

5.2.4. Information composants le PM par type de composant et par niveau

Dans la littérature étudiée, le contenu des PM n'est jamais associé à des niveaux spécifiques. Par ailleurs, il est important de mentionner que le tableau 2 est particulièrement extensif, et que tous les PM ne devront pas nécessairement reprendre toutes les informations qui y sont reprises. En effet, les informations nécessaires dépendent principalement du type d'ouvrage ou d'élément (ex. le PM d'une poutre en béton ne documentera pas de performances thermiques) et du niveau de PM souhaité (ex. un PM de niveau matériau ne documentera pas comment ce matériau est mis en œuvre mais bien quel sera sa valeur de recyclage en fin de vie). Potentiellement, les informations peuvent également dépendre du type d'usage de l'ouvrage et de son contexte, voire des acteurs qui utilisent le PM et de la phase de projet dans laquelle le PM est utilisé. Ainsi, le tableau 2 pourrait être interrogé et utilisé en début de projet de construction, dans le cadre de la définition des exigences d'information telles que défini dans l'ISO 19650 [21].

Toutes ces raisons participent à expliquer pourquoi, à l'heure actuelle, il n'existe pas encore de PM qui convienne à tous les types de composants et à tous les niveaux de PM.

6 Discussion et perspectives pour de futures recherches

Cet article propose un premier état des lieux des pratiques de PM BIM. On identifie en particulier un manque de maturité et de consensus sur le PM en général, et plus précisément concernant le PM BIM (tableaux 1 et 2). Cet état des lieux pointe d'importants besoins de recherche, notamment pour interroger :

- Les besoins en information du PM BIM par les différents acteurs du bâtiment pendant tout son cycle de vie (tableau 2), et l'articulation entre les différents niveaux du PM (fig. 2). En particulier, des enquêtes de terrain sont nécessaires pour interroger les freins et les leviers incombant à la création, au traitement, à l'analyse, au stockage, au partage et à la gestion des données numériques, de manière à encourager la circularité par un meilleur suivi des composants;
- La structuration de ces informations pour les rendre accessibles de façon durable, sur les dizaines d'années du cycle de vie des projets (tableaux 1 et 2), en particulier en interrogeant leur inscription dans des modèles OpenBIM^{****}. La pertinence des systèmes de standardisation de l'information pour le PM BIM sera à analyser (tableau 1), dont les systèmes de classification (comme le BB/sfB pour la Belgique) et l'IFC [41];
- Les outils software (par exemple plateformes et logiciels de traitement d'informations) et hardware (par exemple QR-codes et tablettes) permettant de rendre accessible le PM BIM pendant tout le cycle de vie du bâtiment et ses composants (tableau 1).

Il s'agit bien ici d'interroger et de supporter un écosystème de données du bâtiment à ses différents niveaux, dont les PM évoluent et interagissent pendant les différentes phases du cycle de vie de ses éléments.

7 Conclusion

A la différence d'autres filières industrielles, un bâtiment est un assemblage complexe de nombreux matériaux et composants, dont la taille et la durée de vie sont plus longues que celles de la plupart des autres produits industriels. Le passeport matériau BIM est un outil qui vise à fournir une méthode et une structure de données pour la collecte et le traitement des informations pertinentes du bâtiment et de ses composants, en vue de leur inscription dans une économie circulaire. La numérisation des PM dans le cadre du BIM porte un très grand potentiel (facilité de partage des informations, pérennité des données et traçabilité). Mais si le PM est souvent présenté comme une solution relativement simple à mettre en œuvre, comme une fiche technique ou un passeport d'identité, le détail de son contenu, le support et la gestion de son information sur le long terme sont en réalité très complexes et très peu mis en œuvre. La diversité des usages BIM que doit supporter le PM, les interopérabilités nécessaires et les enjeux de pérennité de la donnée sont des sujets indispensables à l'implémentation du PM BIM et qui sont encore loin d'être résolus.

L'apport de cet article est de proposer un état de l'art des pratiques BIM du PM (tableau 1) et de son besoin en information, à la fois sous l'angle de sa structuration complexe par niveaux, du matériau à la ville (fig. 2), et sous l'angle de son contenu détaillé (tableau 2). Cet état de l'art a permis d'identifier le manque de consensus actuel sur l'implémentation du PM BIM et les défis associés.

^{****} <https://www.buildingsmart.org/about/openbim/openbim-definition/>

Bibliographie

- [1] Ellen MacArthur Foundation, *Towards the Circular Economy: Economy and business rationale for accelerated transition*, J. Ind. Ecol. 98p (2013) - rapport
- [2] W. Polspoel and M. Charlier, *Circubuild, naslagwerk circulair bouwen*. Redactiebureau Palindroom, 280p (2020) - livre
- [3] Service Public de Wallonie, *Circular Wallonia. Stratégie de déploiement de l'économie circulaire*, Jambes, 110p (2021) - rapport
- [4] R. Charef, E. Ganjian, and S. Emmitt, *Socio-economic and environmental barriers for a holistic asset lifecycle approach to achieve circular economy: A pattern-matching method*, Technol. Forecast. Soc. Chang., **170**, p. 120798 (2021) - revue scientifique
- [5] Q. Li and Y. Wang, *Blockchain's role in supporting circular supply chains in the built environment*, IEEE Int. Conf. Blockchain, pp. 578–583 (2021) - conférence
- [6] S. Çetin, C. De Wolf, and N. Bocken, *Circular Digital Built Environment : An Emerging Framework*, Sustain., **13**, 11, p. 6348, (2021) - revue scientifique
- [7] I. Atta, E. S. Bakhoun, and M. M. Marzouk, *Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM*, J. Build. Eng., **43**, p. 103233 (2021) - revue scientifique
- [8] N. Zhang, Q. Han, and B. de Vries, *Building Circularity Assessment in the Architecture , Engineering , and Construction Industry : A New Framework*, Sustain., **12**, 22 (2021) - revue scientifique
- [9] L. B. Jayasinghe and D. Waldmann, *Development of a BIM-Based Web Tool as a Material and Component Bank for a Sustainable Construction Industry*, Sustain., **12**, no. 1766, (2020) - revue scientifique
- [10] J. Kanters, *Design for Deconstruction in the Design Process : State of the Art*, Buildings, **8**, 11, p.150 (2018) - revue scientifique
- [11] M. Honic, I. Kovacic, and H. Rechberger, *Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP) : An Austrian case study*, J. Clean. Prod., **217**, pp. 787–797 (2019) - revue scientifique
- [12] M. R. Munaro, A. C. Fischer, N. C. Azevedo, and S. F. Tavares, *Proposal of a building material passport and its application feasibility to the wood frame constructive system in Brazil Proposal of a building material passport and its application feasibility to the wood frame constructive system in Brazil*, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., **225**, p. 8, (2019) - conférence
- [13] M. Heinrich and W. Lang, *Material Passports - Best Practices: Innovative Solutions for a Transition to a Circular Economy in the Built Environment*. Technische Universität München in association with BAMB (2019) - rapport
- [14] M. Honic, I. Kovacic, P. Aschenbrenner, and A. Ragosnig, *Material Passports for the end-of-life stage of buildings : Challenges and potentials*, J. Clean. Prod., **319**, 128702 (2021) - revue scientifique
- [15] F. Heisel and S. Rau-Oberhuber, *Calculation and evaluation of circularity indicators for the built environment using the case studies of UMAR and Madaster*, J. Clean. Prod., **243**, p. 118482 (2020) - revue scientifique
- [16] I. Kovacic, M. Honic, and M. Sreckovic, *Digital Platform for Circular Economy in AEC Industry*, Eng. Proj. Organ. J., **9**, (2020) - revue scientifique
- [17] B. Sanchez, C. Rausch, C. Haas, and T. Hartmann, *Resources , Conservation & Recycling A framework for BIM-based disassembly models to support reuse of building components*, Resour. Conserv. Recycl., **175**, p. 105825 (2021) - revue scientifique
- [18] M. Honic, I. Kovacic, and H. Rechberger, *Concept for a BIM-based Material Passport for buildings*, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., p. 8 (2019) - conférence

- [19] R. Charef, *The use of Building Information Modelling in the circular economy context : Several models and a new dimension of BIM (8D)* *The use of Building Information Modelling in the circular economy context : Several models and a new dimension of BIM (8D)*, Clean. Eng. Technol., **7**, p. 100414 (2022) - revue scientifique
- [20] A. Aguiar, R. Vonk, and F. Kamp, *BIM and Circular Design*, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., **225** (2019) - conférence
- [21] ISO/TC 59/SC 13, *ISO 19650-1:2018 Organisation et numérisation des informations relatives aux bâtiments et ouvrages de génie civil, y compris modélisation des informations de la construction (BIM) — Gestion de l'information par la modélisation des informations de la const.* Available at: <https://www.iso.org/fr/standard/68078.html> (Accessed: 05 July 2022) - site internet
- [22] R. Charef and S. Emmitt, *Uses of building information modelling for overcoming barriers to a circular economy*, J. Clean. Prod., **285**, p. 124854 (2021) - revue scientifique
- [23] T. Rau and S. Oberuber, *Material Matters. Het alternatief voor onze rooibouwmaatschappij*, Bertram +. Haarlem, 224p (2016) - livre
- [24] L. Luscuere, *Materials Passports : Optimising value recovery from materials*, Waste Resour. Manag., **170** (2016) - revue scientifique
- [25] D. Mulhall, *et al.*, *Framework for Materials passports*, BAMB (2017) - rapport
- [26] E. M. Sauter, R. L. G. Lemmens, and P. Pauwels, *CEO & CAMO Ontologies : a circulation medium for materials in the construction industry*, in: Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), Ghent, Belgium, pp. 1645–1652 (2018) - conférence
- [27] K. G. Jensen and J. Sommer, *Building A Circular Future*, 284p (2016) - livre
- [28] C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, and K. Liston, *BIM handbook: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*. Hoboken, John Wiley & Sons, 626p (2011) - livre
- [29] S. Schaubroeck, R. Dewil, and K. Allacker, *Circularity of building stocks. Modelling building joints and their disassembly in a 3D city model*, Procedia CIRP, **105**, pp. 712–720 (2022) - conférence
- [30] I. Kovacic and M. Honic, *Scanning and data capturing for BIM-supported resources assessment: a case study*, J. Inf. Technol. Constr., **2**, pp. 624–638 (2021) - revue scientifique
- [31] S. Schützenhofer, M. Honic, and I. Kovacic, *Design Optimisation via BIM Supported Material Passports*, eCAADe - D1.T2.S2. Heal. Mater. Archit. CITIES, **1**, pp. 289–296 (2020) - conférence
- [32] M. Honic and I. Kovacic, *Model and data management issues in the integrated assessment of existing building stocks*, Organ. Technol. Manag. Constr., **11**, pp. 2148–2157 (2020) - revue scientifique
- [33] M. Honic, I. Kovacic, G. Sibenik, and H. Rechberger, *Data- and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports*, J. Build. Eng., **23**, pp. 341–350 (2019) - revue scientifique
- [34] A. Almusaed, I. Yitmen, A. Almusaed, I. Akiner, and M. Ernur Akiner, *Coherent Investigation on a Smart Kinetic Wooden Façade Based on Material Passport Concepts and Environmental*, Materials (Basel), **14**, 3771, p. 22 (2021) - revue scientifique
- [35] M. S. Hoosain, B. S. Paul, and S. Ramakrishna, *The Impact of 4IR Digital Technologies and Circular Thinking on the United Nations Sustainable Development Goals*, Sustain., **12**, 10143 (2020) - revue scientifique

- [36] A. Almusaed, A. Almsad, R. Z. Homod, and I. Yitmen, *Environmental Profile on Building Material Passports for Hot Climates*, *Sustain.*, **12**, 3720, p. 20 (2020) - revue scientifique
- [37] A. D. Selman, *Barriers of incorporating circular economy in building design - in a Danish context*, in: *The common of good in construction*, Glasgow, UK (2020) - conférence
- [38] A. Smeets, K. Wang, and M. P. Drewniok, *Can Material Passports lower financial barriers for structural steel re-use ?* In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **225**, 012006 (2019) - conférence
- [39] T. Dounas, W. Jabi, and D. Lombardi, *Topology generated non-fungible tokens : blockchain as infrastructure for a circular economy in architectural design.*, In: *PROJECTIONS, Proceedings of the 26th International CAADRIA 2021*, **2**, pp. 151–160 (2021) - conférence
- [40] N. Futas, N. Rajput, and R. Schiano-Phan, *Cradle to Cradle and Whole-Life Carbon assessment – Barriers and opportunities towards a circular economic building sector* *Cradle to Cradle and Whole-Life Carbon assessment – Barriers and opportunities towards a circular economic building sector*, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, **225**, 012036, p. 8 (2019) - conférence
- [41] Buildingsmart International, *IFC 4.3*. Available at: https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_3/RC1/HTML/ (Accessed: 05 July 2022) - site internet
- [42] Ellen MacArthur Foundation, *A building that can be reused: Brummen Town Hall* Available at: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/brummen-town-hall> (Accessed: 05 July 2022) - site internet
- [43] Ellen MacArthur Foundation, *A leader in the transition to a circular built environment: Arup Group Limited*. Available at: <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-examples/a-leader-in-the-transition-to-a-circular-built-environment-arup-group> (Accessed: 05 July 2022) - site internet
- [44] H. Hartman, *Circular thinking: Will Arup's prototype change the way we design?*, *Architects Journal*. Available at: <https://www.architectsjournal.co.uk/news/opinion/circular-thinking-will-arups-prototype-change-the-way-we-design> (Accessed: 05 July 2022) - site internet
- [45] Madaster Foundation, *Madaster Manuals*, Available at: <https://docs.madaster.com/nl/en/> (Accessed: 05 July 2022) - site internet
- [46] E. Delcourt, A. Romnée, and J.-P. Lahaye, *L'économie circulaire dans le secteur de la construction*, *Rev. Sci. des Ingénieurs Ind.*, **32**, p. 15 (2018) - revue scientifique
- [47] BAMB, *Buildins As Material Bancks*. Available at: <https://www.bamb2020.eu/> (Accessed: 05 July 2022) - site internet
- [48] W. Debacker and S. Manshoven, *D1 Synthesis of the state-of-the-art. Key barriers and opportunities for Materials Passports and Reversible Building Design in the current system*, BAMB (2016) - rapport
- [49] E. Durmisevic *et al.*, *D13 Prototyping + feedback report. Testing BAMB results through prototyping and Pilot Projects*, BAMB (2018) - rapport
- [50] L. Luscuere, R. Zanatta, and D. Mulhall, *Deliverable 7. Operational Materials Passports*, BAMB (2019)- rapport